

(19)日本国特許庁 (JP) (12)特 許 公 報 (B 2) (11)特許番号

第2507041号

(45)発行日 平成 8 年(1996) 6 月12日

(24)登録日 平成 8 年(1996) 4 月 2 日

(51)Int.Cl.⁹ 識別記号 庁内整理番号 FI
G02B 27/46 G02B 27/46
H04N 5/335 H04N 5/335

請求項の数 8 (全15頁)

(21)出願番号 特願平1-109330
(22)出願日 平成 1 年(1989) 4 月28日
(65)公開番号 特開平2-287422
(43)公開日 平成 2 年(1990)11月27日
前置審査

(73)特許権者 999999999
松下電器産業株式会社
大阪府門真市大字門真1006番地
(72)発明者 中山 正明
大阪府門真市大字門真1006番地 松下電
器産業株式会社内
(74)代理人 弁理士 滝本 智之
審査官 津田 俊明
(56)参考文献 特開昭61-9617 (JP, A)
特開昭59-75222 (JP, A)
実開昭62-41122 (JP, U)

(54)【発明の名称】 光学的ローパスフィルタ

1

(57)【特許請求の範囲】

【請求項 1】 固体撮像素子の水平走査方向に対して、略45度の角度で距離 d_1 だけ常光成分と異常光成分とを分離する第1の複屈折板と、上記水平走査方向に対して平行に距離 d_1 だけ常光成分と異常光成分とを分離する第2の複屈折板とが積層配置され、且つ距離 d_1 および距離 d_2 と固体撮像素子の水平画素間隔 P_x との関係が、

$$d_1 \leq P_x / \sqrt{2}$$

且つ $d_2 \leq P_x$ の関係にあることを特徴とする光学的ローパスフィルタ。

【請求項 2】 固体撮像素子の水平走査方向に対して、略45度の角度で距離 d_1 だけ常光成分と異常光成分とを分離する第1の複屈折板と、上記水平走査方向に対して平行に距離 d_1 だけ常光成分と異常光成分とを分離する第2の

2

複屈折板とが積層配置され、且つ距離 d_1 および距離 d_2 と固体撮像素子の水平画素間隔 P_x との関係が、

$$d_1 \leq \sqrt{2} P_x$$

且つ $d_2 \leq P_x / 2$ の関係にあることを特徴とする光学的ローパスフィルタ。

【請求項 3】 固体撮像素子の水平走査方向に対して、略45度の角度で距離 d_1 だけ常光成分と異常光成分とを分離する第1の複屈折板と、上記水平走査方向に対して平行に距離 d_1 だけ常光成分と異常光成分とを分離する第2の複屈折板とが積層配置され、且つ距離 d_1 と距離 d_2 との関係が、

$$d_1 < \sqrt{2} d_2$$

の関係にあることを特徴とする光学的ローパスフィルタ

タ。

【請求項 4】距離 d_1 と固体撮像素子の水平画素間隔 P_1 との関係が、 $d_1 \approx P_1$ の関係にあることを特徴とする請求項 3 記載の光学的ローパスフィルタ。

【請求項 5】距離 d_1 と固体撮像素子の水平画素間隔 P_1 との関係が、 $d_1 < P_1$ 、但し $d_1 \approx P_1$ の関係にあることを特徴とする請求項 3 記載の光学的ローパスフィルタ。

【請求項 6】固体撮像素子の水平走査方向に対して、略 45度の角度で距離 d_1 だけ常光成分と異常光成分とを分離する第 1 の複屈折板と、上記水平走査方向に対して平行に距離 d_1 だけ常光成分と異常光成分とを分離する第 2 の複屈折板とが積層配置され、且つ距離 d_1 と距離 d_2 との関係が、

$$d_2 / \sqrt{2} < d_1 < \sqrt{2} d_2$$

の関係にあることを特徴とする光学的ローパスフィルタ。

【請求項 7】距離 d_1 と固体撮像素子の水平画素間隔 P_1 との関係が、 $d_1 \approx P_1$ の関係にあることを特徴とする請求項 6 記載の光学的ローパスフィルタ。

【請求項 8】距離 d_1 と固体撮像素子の水平画素間隔 P_1 との関係が、 $d_1 < P_1$ 、但し $d_1 \approx P_1$ の関係にあることを特徴とする請求項 6 記載の光学的ローパスフィルタ。

【発明の詳細な説明】

産業上の利用分野

本発明は、2 次元のサンプリングを行う CCD などの固体撮像素子の入射路中に配置され、キャリア成分の影響を抑圧する光学的ローパスフィルタに関する。

従来の技術

第 17 図は、固体撮像素子の画素配列および開口例を示すもので、同図において、H が水平走査方向、V が垂直走査方向を示す。隣接する 2 本の水平ラインの一方には、緑色フィルタ 1G および青色フィルタ 1B が P_1 の水平走査方向の画素間隔で交互に配置され、その他方には緑色フィルタ 2G および赤色フィルタ 2R が P_1 の間隔で交互に配される。この垂直走査方向の画素間隔が P_1 とされる。

このような格子状の開口パターンにより複写体光がサンプリングされるわけであるが、サンプリング定理において明らかなように、サンプリング周波数の $1/2$ の周波数以上の周波数成分は原理的に忠実にサンプリングして再現することができず、これ以上の周波数成分が固体撮像素子上に導かれると、偽信号となって現れることとなる。

上述の固体撮像素子の場合には、第 18 図の空間周波数スペクトラムに示すように、 $(f_x = 0, f_y = 0)$ の位置を中心とするベースバンド成分 (2G, R, B のベクトルで示す) の他に、複数の有害なキャリア成分が発生する。第 18 図の横軸 f_x 、縦軸 f_y は、各々 $P_1/2\pi$ および $P_1/2\pi$ により正規化された水平周波数および垂直周波数を表している。 $(f_x = 1, f_y = 0)$ の位置を中心として生じるキャリ

ア成分は、垂直方向に延びる黒白のストライプからなるきめ細かい縞模様の時にモアレを生じさせ、 $(f_x = 1/2, f_y = 0)$ の位置を中心として生じるキャリア成分は、やや荒い縦ストライプ時に緑色およびマゼンタが生じるクロスカラー現象 (偽色信号) を生じさせ、この偽信号は単板でカラー信号を得ることによって生じるもので画質に与える影響が最も大きい。 $(f_x = 0, f_y = 1)$ の位置を中心として生じるキャリア成分は、細かい横ストライプの時にモアレを生じさせる。

従って、これらの有害なキャリア成分を除去するためには、サンプリング定理に従って、入射光のうち、正規化水平周波数で $f_x = 1/2$ 以上の水平周波数成分、および正規化垂直周波数で $f_y = 1/2$ 以上の垂直周波数成分および水平方向には $f_x = 1/2$ の点で色信号をサンプリングしている為、 $f_x = 1/2$ の点を中心に色信号の周波数帯域分の水平周波数成分を除去する必要がある。このような理想的な光学的周波数特性を第 19 図に示す。同図で (A) は水平周波数特性、(B) は垂直周波数特性を表す。

このような特性を目標とした光学的ローパスフィルタの第 1 の従来例としては、特開昭 60-164719 号公報に示されるものがある。これは、固体撮像素子の水平走査方向に対して、45 度近傍で常光成分と異常光成分とを分離する第 1 の複屈折板と、水平走査方向と平行に常光成分と異常光成分とを分離する第 2 の複屈折板と、水平走査方向に対して、-45 度近傍で常光成分とを分離する第 3 の複屈折板よりなり、第 2 の複屈折板が中間に位置するように、第 1 の複屈折板、第 2 の複屈折板および第 3 の複屈折板が積層配置され、1 本の入射光を 7 もしくは 8 本に分離する光学的ローパスフィルタの基本的な技術を示したものであるが、実施例としては第 1, 第 2, 第 3 の複屈折板による常光成分と異常光成分との分離距離 (それぞれ、 d_1, d_2, d_3 とする。) の関係が、 $d_1 \approx P_1$ 、且つ

$$d_1 \approx d_3 \approx d_2 / \sqrt{2}$$

の関係にある例が示されている。このような従来の光学的ローパスフィルタによっては、1 本の入射光は第 20 図に示すように分離され、その周波数特性は第 21 図に示すようになる。

第 21 図において (A) は水平方向の周波数特性を示し、同図 201 の曲線で示す $f_x = 1/2, 3/2, \dots$ にトラップポイントを有する COS カーブと、同図 202 の曲線で示す $f_x = 1, 3, \dots$ にトラップポイントを有する COS' カーブを合成した曲線 203 が総合の水平方向の通過特性となる。また第 21 図において (B) は垂直方向に周波数特性を示すが、 $f_y = P_1/P_1$ の奇数倍の周波数にトラップポイントを有する COS' カーブ (同図 204 の曲線) が垂直方向の通過特性となる。

従来の光学的ローパスフィルタの他の例 (第 2 の従来例) としては、第 23 図に示すように、水平走査方向に異常光成分と正常光成分を距離 $d_1 (= P_1)$ だけ分離する第

1の複屈折板221と、水平走査方向に異常光成分と正常光成分を距離 $d_1 (=P_1/2)$ だけ分離する第2の複屈折板222と、垂直走査方向に異常光成分と正常光成分とを距離 $d_2 (=P_2)$ だけ分離する第3の複屈折板223とをそれぞれ第1,第2の $\lambda/4$ 位相板224,225を介して順に積層した構成のものがあり、この第2の従来例の光学的ローパスフィルタによっては、1本の入射光は第24図に示すように分離され、その周波数特性は、第25図に示すようになる。

第25図において(A)は水平走査方向の周波数特性を示し、 $f_1 = 1/2, 3/2, \dots$ にトラップポイントを有するCOSカーブと(同図曲線241)、 $f_2 = 1, 2, \dots$ にトラップポイントを有するCOSカーブ(同図曲線242)を合成(積算)した同図曲線243のカーブの特性となる。また第25図において(B)は垂直方向の周波数特性を示すが、 $f_1 = 1/2, 3/2, \dots$ にトラップポイントを有するCOSカーブ(同図曲線244)が垂直方向の通過特性となる。以上の特性は、ほぼ第19図に示した理想特性に近い値となっている。

更に、従来の光学的ローパスフィルタの他の例(第3の従来例)としては、第26図に示すように、第23図に示した第2の従来例から第3の複屈折板と第2の $\lambda/4$ 位相板を除去したものがある。この第3の従来例によっては、1本の入射光は第27図に示すように分離される。その周波数特性は、水平走査方向の周波数特性は第25図(A)に示した第2の従来例の水平走査方向の周波数特性と同一特性となり、垂直走査方向には減衰特性を有さない特性となる。この第3の従来例は、垂直走査方向の特性を無視して、小型・低コスト化を主目的とした例である。なお、この例でも第2の従来例と同じく水平方向の周波数特性は、ほぼ理想的特性に近い値となる。

発明が解決しようとする課題

しかしながら、上述した従来の光学的ローパスフィルタには下記のような問題点がある。

第1の従来例における問題点は大きく2つあり、その第1は、水晶複屈折板が3枚必要であり、小型化・低コスト化を大きく阻害することである。ちなみに、上述のような光学的ローパスフィルタの価格は、ほぼその構成枚数に比例する。

第2は、下記のように垂直方向の遮断特性が不満足となる場合が存在することである。つまり、上述した従来の光学的ローパスフィルタの通過特性のうち、水平方向の特性は本来遮断すべき周波数成分は遮断されていて第19図(A)に示した理想特性に近い特性が得られているが、垂直方向の特性には次のような問題点がある。

第20図のように分離された1本の入射光の垂直方向の分離距離は、 $P_1/2$ を基準としたものであり、画素の水平方向間隔 P_1 により決定されていて、画素の垂直方向間隔 P_2 によっては決定されていない。従って垂直方向の周波数特性の通過特性のトラップポイントは理想値が $1/2$ であるのに対し $P_2/2\pi$ で正規化した垂直周波数の P_2/P_1 の

点(およびその奇数倍の周波数)となり、 P_1 と P_2 の関係によってトラップ点が変わることとなる。したがって P_2/P_1 が $1/2$ に近い値をとる固体撮像素子では、上述した従来の光学的ローパスフィルタでは必要な垂直方向通過特性が得られるが、 P_2 が $2P_1$ より小さくなって P_2/P_1 が $1/2$ と大きく異なる値となる固体撮像素子用には必要な特性が得られなくなる。このような状態は、水平解像度を上げる為に水平方向の画素数を多くした固体撮像素子において発生する。つまり、垂直方向の画素数 n_2 がテレビジョン方式に基づいて決定される値(NTSC方式では約500画素・PAL方式では約600画素)に固定されているため P_2 が一定であるのに対し、 P_1 は水平方向画素数 n_1 の変化により変化し、従って n_2 が多くなると P_2/P_1 は大きくなる。例えばNTSC様式で水平方向画素数が670画素の場合には、テレビジョン画素の縦・横比が3:4($\approx 500:670$)であるので、 $P_2 \approx P_1$ となる。このような場合の、従来の光学的ローパスフィルタの垂直方向の通過特性は、第22図211の曲線に示す特性となり、同図212の曲線に示す理想特性との遮断周波数域の被写体として表れる確率の高い、低い周波数領域における特性差が大きくなり、偽信号が大きくなる。(ちなみに、水平画素数が約400と少ない場合には、 $P_2/P_1 = 3/500/4/400 \approx 0.6$ となり、この場合の特性は同図213の曲線となり、遮断域の低周波数領域での理想性との差は少なく、従来の光学的ローパスフィルタで十分な特性が得られている。)

第2の従来例の問題点は、周波数特性はほぼ理想に近い特性が得られるが、フィルタの構成枚数が複屈折板3枚と $\lambda/4$ 位相板2枚の計5枚となり、小型化・低コスト化特に低コスト化を大きく阻害することである。

第3の従来例の問題点は、垂直走査方向の周波数特性を割り切って低コスト化を目指しているにもかかわらず、その構成枚数が3枚であり、コストと性能のバランスが悪いことである。

以上述べたように、従来の光学的ローパスフィルタには、小型・低コスト化を阻害するという第1の問題点と、低コスト化を目標としたものは、コストダウン比率に比し性能の劣化が大きいという第2の問題点がある。課題を解決するための手段

上述した課題を解決するため、第1の発明は、固体撮像素子の水平走査方向に対して、略45度の角度で距離 d_1 だけ常光成分と異常光成分とを分離する第1の複屈折板と、上記水平走査方向に対して略平行に距離 d_2 だけ常光成分と異常光成分とを分離する第2の複屈折板とよりなり、上記第1,第2の複屈折板が積層配置された光学的ローパスフィルタである。

また、第2の発明は、固体撮像素子の水平走査方向に対して、略

$$\sin^{-1} 1/\sqrt{3}$$

の角度で距離 d_1 だけ常光成分と異常光成分とを分離する

第1の複屈折板と、上記水平走査方向に対して略平行に距離 d_1 だけ常光成分と異常光成分とを分離する第2の複屈折板とよりなり、上記第1,第2の複屈折板が積層配置された光学的ローパスフィルタである。

また、第3の発明は、固体撮像素子の水平走査方向に対して、略垂直に d_1 だけ常光成分と異常光成分とを分離する第1の複屈折板と、上記水平走査方向に対して略45度の角度で距離 d_1 だけ常光成分と異常光成分とを分離する第2の複屈折板と、上記水平走査方向に対して、略平行に距離 d_1 だけ常光成分と異常光成分とを分離する第3の複屈折板とよりなり、上記第2の複屈折板が中間に位置するように、上記第1,第2,第3の複屈折板が積層配置された光学的ローパスフィルタである。

作用

本発明は、上記した構成の光学的ローパスフィルタで、小型・低コストを達成し、更に、固体撮像素子の水平画素間隔 P_x と垂直画素間隔 P_y との関係が P_x/P_y の値が1/2と大きく異なる場合にも、水平方向のみならず垂直方向の周波数特性も理想特性に近い値を達成して、偽信号の発生が少ない固体撮像装置を実現するものである。

実施例

以下本発明について図面を参照して説明する。第1図は第1の発明の一実施例における第1の複屈折板11、第2の複屈折板12の光学的特性の説明に用いるものである。同図において、レンズを介された入射光は、図面の用紙面に直交する方向で複屈折板11,12に供給される。複屈折板11は、入射光を常光線および異常光線に分離し、これらの常光線および異常光線が存在する図面の用紙面と垂直に延びる主要面13が水平走査方向Hに対して略45度の角度をなすものである。複屈折板12は、常光線および異常光線が存在する主要面14が水平走査方向と略一致するものである。これら2個の複屈折板11,12は積層され、第1もしくは第2の複屈折板が固体撮像素子に最も近い位置に来るように入射光略中に配される。なお、以降の説明は第2の複屈折板が固体撮像素子に最も近い位置に配されているとして説明を行う。また、2枚の複屈折板11,12の主要面の互いのなす角度は、相対的なものであり、角度の計測方法は時計回り、反時計回りのいずれであっても良い。

次に本実施例における2枚の複屈折板によって入射光が分離される分離距離の一般解について説明する。

いま第1の複屈折板による常光線と異常光線の分離距離を d_1 、第2の複屈折板による常光線と異常光線の分離距離を d_2 とし、

$$d_2 / \sqrt{2} < d_1 < \sqrt{2} d_2$$

の条件にあるときに、この2枚の複屈折板の上記した組合せによる入射光の分離された結果は第2図に示すようになる。つまり、第2図の原点に入射された1本の光は、第1の複屈折板11により、水平走査方向に対し45度

の方向に距離 d_1 だけ分離され、(第2図の実線の矢印で示す。)各々等しい強度の2本の光線となる。次にこれらの光線は第2の複屈折板12によって、各々水平走査方向に対して平行に距離 d_2 だけ分離され(第2図の破線の矢印で示す。)、最終的に第2図に示すような、各々強度の等しい21~24の4本の光線に分離される。

この光学的ローパスフィルタは、水平方向には $P_x/2\pi$ で正規化した水平周波数の $1/2 \cdot P_x/d_1 (=f_{m1})$ の奇数倍の点にトラップポイントを有するCOSカーブの周波数特性と、

$$1/2 \cdot P_x / d_1 / \sqrt{2} (=f_{x02})$$

の奇数倍の点にトラップポイント有するCOSカーブの周波数特性との積の周波数特性を有し、垂直方向には、 $1/2 \cdot P_y / d_1 / \sqrt{2} (=f_{y01})$

の奇数倍の点にトラップポイントを有するCOSカーブの周波数特性を有している。つまり、本実施例の光学的ローパスフィルタの水平方向の周波数特性は $\cos \cdot f_x / f_{m1} \cdot \pi/2 \times \cos f_x / f_{m1} \cdot \pi/2$ の特性となり、垂直方向には $\cos f_y / f_{m1} \cdot \pi/2$ の周波数特性を有する。

次にこの実施例において、第1の従来例の課題の項で引用したような、 P_x と P_y が略等しい場合に、望ましい水平および垂直周波数特性が得られるように、 d_1 および d_2 の値を決定した場合の特性について述べる。

いま

$$d_2 = P_x, \quad d_1 / \sqrt{2} = 2/3 \cdot P_x$$

とすると、(従って、

$$d_1 = 2\sqrt{2}/3 \cdot d_2 = 0.943 d_2$$

であり、第1の従来例の

$$d_1 = d_2 / \sqrt{2} = 0.707 d_2$$

とは大きく異なる) $f_{m1} = 1/2 \cdot f_{m1} = 1.5/2, f_{m1} = 1.5/2$ となり、水平方向の周波数特性は、第3図(A)の曲線31に示す $\cos f_x / f_{m1} \cdot \pi/2$ の曲線と、32に示す $\cos f_y / f_{m1} \cdot \pi/2$ の曲線を合成した曲線33の特性となり、第21図(A)曲線203に示す第1の従来例

$$(d_2 = P_x, \quad d_1 = d_2 / \sqrt{2})$$

の特性と同じく曲線30に示す理想特性(第19図(A)の曲線を再掲)に近い遮断特性が得られている。

また、垂直方向の周波数特性は、第3図(B)の曲線34に示す特性となり、同図曲線36に示す従来例の特性(第21図曲線204を再掲)に近い特性となっている。

以上の例の一般解について考察する。本発明では、従来例(第1の従来例)のように、

$$d_1 = d_2 / \sqrt{2} = P_x / \sqrt{2}$$

に固定、従って、 $f_{m1} = 2 \cdot f_{m1}$, $f_{m1} = P_1 / p_1 \cdot 2f_{m1}$ に固定されるのではなく、 d_1 を p_1 の値をも考慮して決定して、 $f_{m1} < f_{m1} < 2 \cdot f_{m1}$ の値とし、従って $f_{m1} = P_1 / p_1 \cdot f_{m1} < P_1 / p_1 \cdot 2f_{m1}$ とすることができ、垂直方向の周波数特性は第 1 の従来例と同様に理想特性から少し異なった値となるものの、第 1 の従来例より少ない枚数の構成で水平・垂直双方の周波数特性ともにほぼ良好な特性が得られる。

なお、一般解として、 d_1 の値の望ましい範囲は次のとおりである。つまり f_{m1} を f_{m1} より小さな値に設定すると、水平方向の周波数特性の本来通過させるべき周波数

$$d_2 / \sqrt{2} < d_1 < \sqrt{2} d_2 \approx \sqrt{2} P_x$$

のようになる。

なお、以上の説明では $d_1 \approx P_1$ 、従って $f_{m1} = 1/2$ とした例を説明したが、この時に f_{m1} が f_{m1} に近くなると、水平方向の通過特性が劣化（通過パワーが小さくなる）しすぎるので、これを防止するには、 f_{m1} の値を $1/2$ より少し大きくする（従って d_1 を P_1 より少し小さくする。）ことで、遮断特性をあまり劣化させることなく達成できる。

第 4 図および第 5 図はそれぞれ第 1 の発明の第 2, 第 3 の実施例における入射光の分離の様子を示す図である。第 4 図の例は第 1 の実施例と同一構成で $d_1 \approx P_1$,

$$d_1 / \sqrt{2} \approx P_x / 2$$

としたものであり、水平走査方向の周波数特性は、 $P_1 / 2\pi$ で正規化した水平周波数の $1/2$ の奇数倍の点にトラップポイントを有する COSカーブと、 1 の奇数倍の点にトラップポイントを有する COSカーブを積算したものとなり、第 6 図 (A) の曲線 61 に示す特性となり、ほぼ満足のゆく特性が得られる。垂直走査方向の周波数特性は、 $P_1 / 2\pi$ で正規化した垂直周波数の $1/2P_1 / P_1$ の奇数倍の点にトラップポイントを有する COSカーブとなり（第 6 図 (B) 曲線 62）、 $P_1 / P_1 / 2 \approx 1$ の固体撮像素子ではほぼ満足のゆく特性が得られ、またこの条件にない固体撮像素子においても、垂直走査方向の特性の理想特性からのずれを許容すれば、水平走査方向の特性は、ほぼ理想特性にあるので十分使用可能である。

第 5 図の例は、第 1 の実施例と同一構成で、 $d_1 \approx P_1 / 2$,

$$d_1 / \sqrt{2} \approx P_x$$

とした第 3 の実施例を示すものであり、水平走査方向の周波数特性は第 2 の実施例と同一で、第 6 図 (A) の曲線 61 に示す特性となる。垂直走査方向の周波数特性は、 $P_1 / 2\pi$ で正規化した垂直周波数の $1/2 \cdot P_1 / P_1$ の奇数倍の点にトラップポイントを有する COSカーブとなり（第 6 図 (B) 曲線 63） $P_1 / P_1 \approx 1$ の固体撮像素子においてほぼ満足のゆく特性が得られる。

領域での特性が劣化（通過パワーが小さくなりすぎる）してしまうので、 $1/2 = f_{m1} < f_{m1}$ の値に設定するのが現実的である。

この条件を d_1 , d_2 , P_1 の関係に書き改めると、

$$d_1 < \sqrt{2} d_2 \approx \sqrt{2} P_x$$

となる。また、従来例の説明の項で説明したように、従来例のように $f_{m1} = 2 \cdot f_{m1}$ とすると問題点が生じ、 $f_{m1} < 2 \cdot f_{m1}$ とする必要があるので、この条件を含めた d_1 , d_2 , P_1 の望ましい関係は

以上のように、第 1 の発明では、複屈折板 2 板だけの簡単な構成の光学的ローパスフィルタでほぼ満足のゆく特性が得られる。少なくとも、水平走査方向の周波数特性に関しては、水平走査方向の画素間隔 P_1 と垂直走査方向の画素間隔 P_2 との比に関係なく、理想に近い特性を得ることができる。

次に第 2 の発明の一実施例について図面を参照して説明する。第 7 図は、この実施例における第 1 の複屈折板 71, 第 2 の複屈折板 72 の光学的特性の説明に用いるものである。同図において、レンズを介された入射光は、図面の用紙面に直交する方向で複屈折板 71, 72 に供給される。複屈折板 71 は、入射光を常光線および異常光線に分離し、これらの常光線および異常光線が存在する図面の用紙面と垂直に延びる主要面 73 が水平走査方向 H に対して略

$$\sin^{-1} 1 / \sqrt{3} \text{ 度 } (\approx 35.3 \text{ 度})$$

の角度をなすものである。複屈折板 72 は、常光線および異常光線が存在する主要面 74 が水平走査方向と略一致するものである。これら 2 個の複屈折板 11, 12 は積層され、第 1 もしくは第 2 の複屈折板が固体撮像素子に最も近い位置に来るように入射光路中に配される。なお、以降の説明は第 2 の複屈折板が固体撮像素子に最も近い位置に配されているとして説明を行う。また、2 枚の複屈折板 71, 72 の主要面の互いのなす角度は、相対的なものであり、角度の計測方法は時計回り、反時計回りいずれであっても良い。

次に本実施例における 2 枚の複屈折板によって入射光が分離される分離距離および分離された光の強度について説明する。

いま第 1 位の複屈折板による常光線と異常光線の分離距離を d_1 とすると、第 8 図の原点に入射された 1 本の光は、第 1 の複屈折板 71 により、水平走査方向に対し

$$\sin^{-1} 1 / \sqrt{3} \text{ 度 } (\approx 35.3 \text{ 度})$$

の方向に距離 d_1 だけ分離され、（第 8 図の実線の矢印で示す。）各々等しい強度の 81 および 82 の 2 本の光線とな

11

る。次にこれらの光線は第2の複屈折板72に入射するわけであるが、この2本の光線の第2の複屈折板72に対する異常光成分と常光成分は次のようになる。まず光線81は第1の複屈折板71における常光成分であるので、その主要面73に対して垂直に振動する成分だけである(第8図光線81のベクトル E_1)。従って、この光線81のうち第2の複屈折板72に対して常光成分となるのは、第2の複屈折板72の主要面74に対して垂直に振動する成分であるので $E_1 \cos \beta$ となり、異常光成分となるのは主要面74に対して平行に振動する成分 $E_1 \sin \beta$ である。また、光線82は第1の複屈折板71における異常光成分であるので、その主要面73に対して平行に振動する成分だけである(第8図光線82のベクトル O_1)。従って光線81のときと同様に、光線82のうち、第2の複屈折板72に対して常光成分は $E_1 \sin \beta$ 、異常光成分は $E_1 \cos \beta$ となる。なお、上

$$(1/\sqrt{2} \cdot \cos \beta)^2, \text{光線 9 2 は } (1/\sqrt{2} \cdot \sin \beta)^2,$$

光線93は

$$(1/\sqrt{2} \cdot \sin \beta)^2, \text{光線 9 4 は } (1/\sqrt{2} \cdot \cos \beta)^2$$

となり、

$$\sin \beta \approx 1/\sqrt{3}, \quad \cos \beta \approx \sqrt{2/3}$$

となるよう角度 β を選んでいるので、それぞれ1/3, 1/6, 1/6, 1/3となる。

よって、この光学的ローパスフィルタによる周波数特

$$d_3 \approx \sqrt{3/2} \cdot 2/3 P_x, \quad \beta = \sin^{-1} 1/\sqrt{3}$$

とした時の周波数特性を示す。同図(A)は水平走査方向の周波数特性であり、 $1/3(2 \cdot \cos 2\pi \cdot 2/3f_i + 1)$ の曲線となる。この特性は、 f_i が1以上での遮断特性は悪いが、 f_i が1以下ではほぼ良好な特性が得られていて、光学的ローパス以外にも撮影レンズも光学的なロー

記した光線81, 82のベクトル振幅 O_1 と E_1 は、それぞれが等しく、しかもベクトル和

$$\sqrt{O_1^2 + E_1^2}$$

が入射光に一致するので、入射光の強度を1とすると、それぞれ

$$1/\sqrt{2}$$

となることは明かである。従って、上記の2つの光線81, 82が第2の複屈折板72によって、水平走査方向に距離 d_1 ($d_1 = d_1 \cos \alpha$) だけ常光成分と異常光成分に分離されると、第9図に示すように、光線91~94となる。それぞれの強度は、つまりエネルギーは、それぞれのベクトル振幅の2乗で表されるので、光線91は

性は、水平走査方向には $1/3(2 \cos 2\pi \cdot f_i / P_i / d_1 + 1)$ となり、垂直方向には $\cos \pi/2 \cdot f_i / f_{m1}$ ($f_{m1} = 1/2 \cdot P_i / d_1 \sin \alpha = 1/2 \cdot P_i / d_1 \tan \alpha$)となる。

第10図に上記の第2の発明の構成の光学的ローパスフィルタにおいて、 $d_1 \approx 2/3 P_i$,

パス効果を有している(つまりレンズ収差等の為に高周波域は解像できない)ことを考慮すると、十分使用可能な特性である。また同図(B)は垂直走査方向の周波数特性であり、

$$\cos \pi$$

$$\begin{aligned} & / 2 \cdot f_y / f_{y02} \quad (f_{y02} = 1/2 \cdot P_y / 2/3 \cdot P_x \cdot \tan \alpha \\ & = 1/2 \cdot P_y / 2/3 \sqrt{2} \cdot P_x) \end{aligned}$$

の曲線となる。この特性は、

$$P_y \approx 2/3 \sqrt{2} P_x$$

$$d_3 = \sqrt{3/2} \cdot P_x, \quad \beta = \sin^{-1} 1/\sqrt{3}$$

とした時の周波数特性を示す。同図(A)は水平走査方向の周波数特性であり、 $1/3(2 \cdot \cos 2\pi \cdot f_i + 1)$ の曲線となり、 $f_i = 1/3, 2/3$ にトラップポイントを有する。このような特性は、第12図に例を示すような固体撮像素子の水平走査方向の3つの画素毎に1つの色がくり返されるような色フィルタを配した撮像素子用の光学的

40 のときには、ほぼ理想に近い特性となる。

第11図に、同様に、第2の発明の構成の光学的ローパスフィルタにおいて、 $d_1 \approx P_i$,

ローパスフィルタに要求される特性であり、このような撮像装置に使用できる。なお、第12図の例は水平走査方向の各画素毎に12赤(R)、緑(G)、青(B)の色フィルタを配した例であり、1色のフィルタは水平方向の1つの画素毎に割り当てられている。(つまり色フィルタの1色の幅は水平走査方向の画素間隔 P_i に等しい。)

また、第11図(B)は垂直走査方向の周波数特性を示

$$\cos \pi / 2 \cdot f_y / f_{y02} \quad (f_{y02} = 1/2 \cdot P_y$$

$$/ P_x \cdot \tan \alpha = 1/2 \cdot P_y / P_x / \sqrt{2})$$

の曲線となる。この特性は、

$$P_y \approx P_x / \sqrt{2}$$

のときにほぼ理想に近い特性となる。

以上のように、第2の発明でも、複屈折板2枚だけの簡単な構成の光学フィルタでほぼ満足のゆく特性が得られる。少なくとも水平走査方向の周波数特性に関しては、水平走査方向の画素間隔 P_x と垂直走査方向の画素間隔 P_y との比に関係なく、理想に近い特性を得ることができる。

次に本発明の第3の発明の一実施例について図面を参照して説明する。第13図は、この一実施例における第1の複屈折板131、第2の複屈折板132、第3の複屈折板133の光学的特性の説明に用いるものである。同図において、レンズを介された入射光は、図面の用紙面に直交する方向で複屈折板131、132、133に供給される。複屈折板131は、入射光を常光線および異常光線に分離し、これらの常光線および異常光線が存在する図面の用紙面と垂直に延びる主要面134が水平走査方向Hに対して略90度の角度をなすものである。複屈折板132は、常光線および異常光線が存在する主要面135が水平走査方向に対して略45度の角度をなすものである。複屈折板133は、その主要面136が水平走査方向Hに対して略一致するものである。これら3個の複屈折板131、132、133第2の複屈折板132が中間に位置するように積層され、第1もしくは第3の複屈折板が固体撮像素子に最も近い位置に来るように入射光路中に配される。なお、以降の説明は第3の複屈折板が固体撮像素子に最も近い位置に配されているとして説明を行う。また、3枚の複屈折板131、132、133の主要面の互いのなす角度は、相対的なものであり、角度の計測方法は時計回り、反時計回りいずれであっても良い。

次に本実施例における3枚の複屈折板によって入射光が分離される分離距離の一般解について説明する。

いま第1の複屈折板による常光線と異常光線の分離距離を d_1 、第2の複屈折板による常光線と異常光線の分離距離を d_2 、第3の複屈折板による常光線と異常光線の分離距離を d_3 としたときに、この3枚の複屈折板の上記した組み合わせによる入射光の分離された結果は第14図に示すようになる。つまり、第14図の原点に入射された1本の光は、第1の複屈折板131により、水平走査方向に対し90度の方向に距離 d_1 だけ分離され、(第14図の実線の矢印で示す。)各々等しい強度の2本の光線となる。次にこれらの光線は第2の複屈折板132によって、各々水平走査方向に対して45度の方向に距離 d_2 だけ分離され

(第14図の破線の矢印で示す。)、各々等しい強度を有する4本の光線となる。次にこれら4本の光線は第3の複屈折板133によって、各々水平走査方向に平行に距離 d_3 だけ分離され(第14図の一点鎖線の矢印で示す。)、最終的に第14図に示すような、各々強度の等しい141~148の8本の光線に分離される。

この光学的ローパスフィルタは、 $P_x/2\pi$ で正規化した水平周波数の $1/2 \cdot P_x/d_1 (=f_{m1})$ の奇数倍の点にトラップポイントを有するCOSカーブの周波数特性と

$$1/2 \cdot P_x / d_1 / \sqrt{2} (=f_{x02})$$

の奇数倍の点にトラップポイントを有するCOSカーブの周波数特性との積の周波数特性を有し、垂直方向には、 $P_y/2\pi$ で正規化した垂直周波数の $1/2 \cdot P_y/d_2 (=f_{m2})$ の奇数倍の点にトラップポイントを有するCOSカーブの周波数特性と

$$1/2 \cdot P_y / d_2 / \sqrt{2} (=f_{y02})$$

の奇数倍の転移トラップポイントを有するCOSカーブの周波数特性との積の周波数特性を有している。つまり本実施例の光学的ローパスフィルタの水平方向の周波数特性は $\cos f_x/f_{m1} \cdot \pi/2 \times \cos f_x/f_{m1} \cdot \pi/2$ の特性となり、垂直方向には $\cos f_y/f_{m2} \cdot \pi/2 \times \cos f_y/f_{m2} \cdot \pi/2$ の周波数特性を有することとなる。

第15図に、上記第3の発明の光学的ローパスフィルタにおいて、 $d_1 \approx P_x$ 、

$$d_2 \approx P_x / \sqrt{2}, d_3 \approx P_y$$

としたとき、つまり $f_{m1} \approx 1/2, f_{m2} \approx 1, f_{m3} \approx 1/2, f_{m4} \approx P_x/P_y$ のときの周波数特性を示す。同図(A)曲線151は水平走査方向の周波数特性であり、第3の従来例の特性(第25図(A)曲線)と全く同一の特性が得られ、良好な特性である。

第15図(B)曲線152は垂直走査方向の周波数特性であり、第3の従来例の特性(第25図(B)曲線)以上に同図曲線153に示す理想特性(第19図(B)の曲線を再掲)に非常に近い良好な特性である。

同様に、第16図は、上記第3の発明の光学的ローパスフィルタにおいて、 $d_1 \approx P_x$ 、

$$d_2 \approx P_x / \sqrt{2},$$

$d_3 \approx P_y/2$ としたとき、つまり $f_{m1} \approx 1/2, f_{m2} \approx 1, f_{m3} \approx 1, f_{m4} \approx P_x/P_y$ のときの垂直走査方向の周波数特性である。この例は上記の第3の発明の第1の実施例では、通過帯域のエネルギーが低下しすぎる場合に、阻止帯域の

減衰特性を少し犠牲にして、通過帯域の減衰特性を良好にした例である。なお、この例における水平走査方向の周波数特性は第15図 (A) に示す第1の実施例と同一で

$$f_{y02} \approx 1 \quad (d_0 \approx P_x / \sqrt{2} \text{ として } f_{x02} \approx 1$$

としているため) となって、 f_{m1} 、 f_{m2} ともに理想に近い値とすることができるが、 $P_1 \neq P_2$ のときには

$$d_0 \approx (P_x + P_y) / 2\sqrt{2}$$

とすれば、 f_{m1} 、 f_{m2} ともにバランスのとれた値とすることができ、水平走査方向、垂直走査方向ともに良好な周波数特性を得ることができる。

以上のように、第3の発明では、複屈折板3板だけの構成で、水平走査方向、垂直走査方向ともに独立に周波数特性を決定でき、従って水平走査方向の画素間隔 P_x と垂直走査方向の画素間隔 P_y との比に関係なく、いずれの方向にも満足の良い特性を得ることができる。たとえば、従来例の中で最も特性の良好な第2の従来例と比較すると、従来例においては、 $\lambda/4$ 位相板を含めて5枚構成であったのに比し、本発明はその構成板数が少なく更に特性が向上している。

発明の効果

以上のように本発明によれば、従来例に比し少ない構成枚数で、従来例と同等以上の性能の光学的ローパスフィルタを得ることができ、小型化・低コスト化・性能向上を図ることができる。

【図面の簡単な説明】

第1図は第1の発明の実施例に用いる各複屈折板の光学的特性の説明に用いる略構成図、第2図は第1の発明の第1の実施例による入射光線の分離される様子を示す説明図、第3図は第1の発明の光学周波数特性の一般解を示す特性図、第4図、第5図は第1の発明の第2、第3の実施例による入射光線の分離される様子を示す説明図、

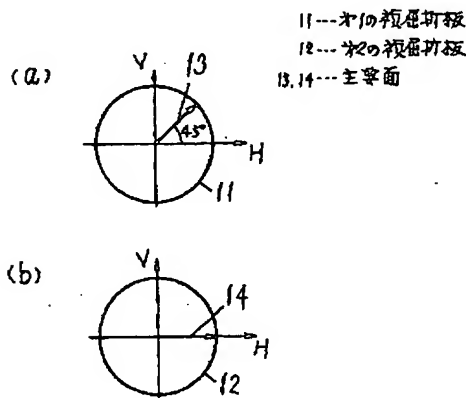
ある。

なお、以上の例では、 $P_1 \approx P_2$ のときに

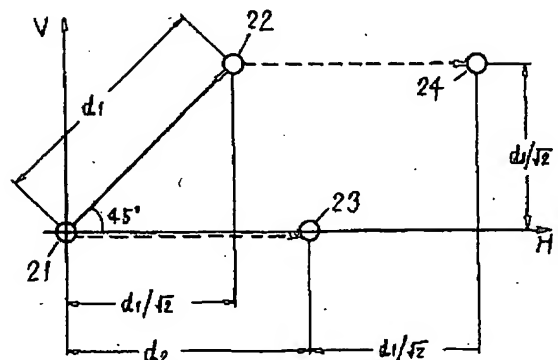
第6図はその光学周波数特性図、第7図は第2の発明の実施例に用いる複屈折板の光学的説明用の略構成図、第8図、第9図はこの発明による入射光線の分離される様子を示す説明図、第10図、第11図はこの発明における第1、第2の実施例の光学周波数特性図、第12図はこの発明の第2の実施例の光学的ローパスフィルタを適用するのに適した固体撮像素子の色フィルタ構成図、第13図は第3の発明に用いる各複屈折板の光学的説明に用いる略構成図、第14図はこの発明による入射光線の分離される様子を示す説明図、第15図、第16図はこの発明による第1、第2の実施例における光学周波数特性図、第17図は本発明を適用するCCD固体撮像素子の開口パターンの一例の拡大平面図、第18図はこのCCD固体撮像素子により得られる空間周波数スペクトラム図、第19図はこのCCD固体撮像素子に必要な光学的ローパスフィルタの理想特性を示す特性図、第20図は第1の従来例の光学的ローパスフィルタによる光線分離の様子を示す説明図、第21図、第22図はこの従来例の光学的ローパスフィルタの周波数特性図、第23、第26図は、それぞれ第2、第3の従来例の光学的ローパスフィルタの略構成図、第24図、第27図はこの従来の光学的ローパスフィルタによる光線分離の様子を示す説明図、第25図はこの従来例の光学的ローパスフィルタの周波数特性図である。

11…第1の複屈折板、12…第2の複屈折板、13、14…主要面、71…第1の複屈折板、72…第2の複屈折板、73、74…主要面、131…第1の複屈折板、132…第2の複屈折板、133…第3の複屈折板、134、135、136…主要面。

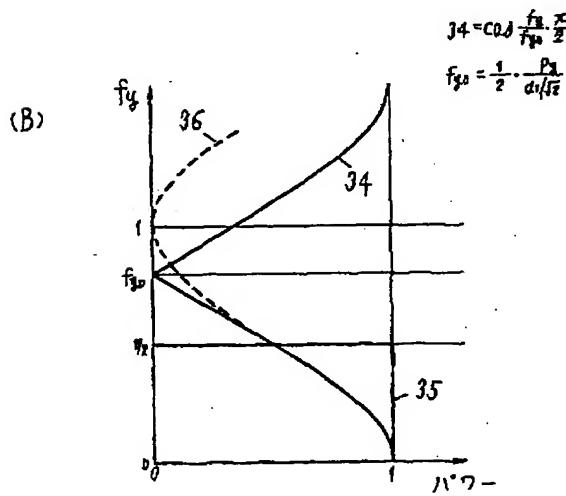
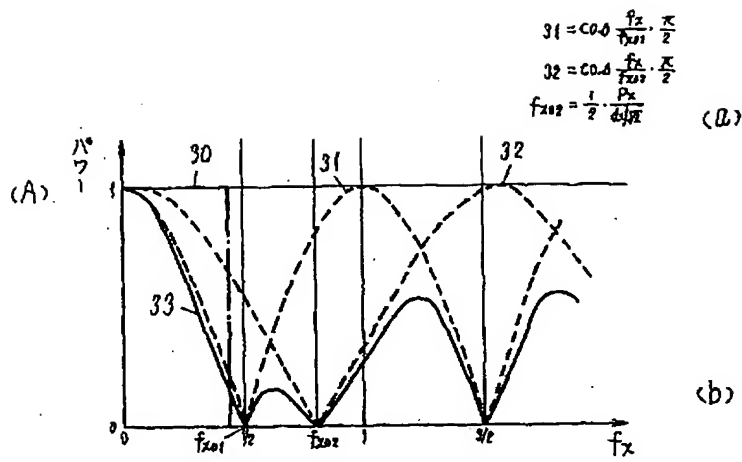
【第1図】



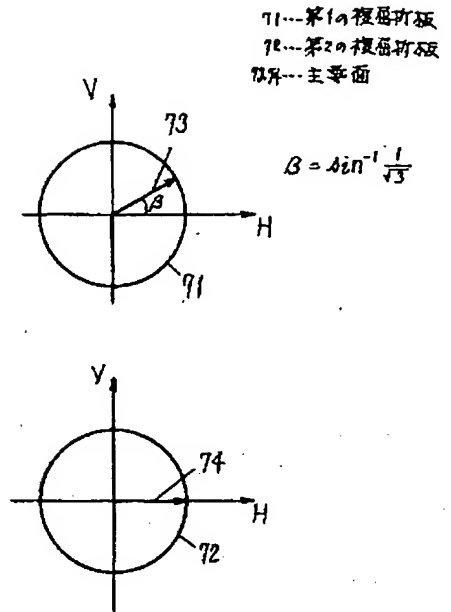
【第2図】



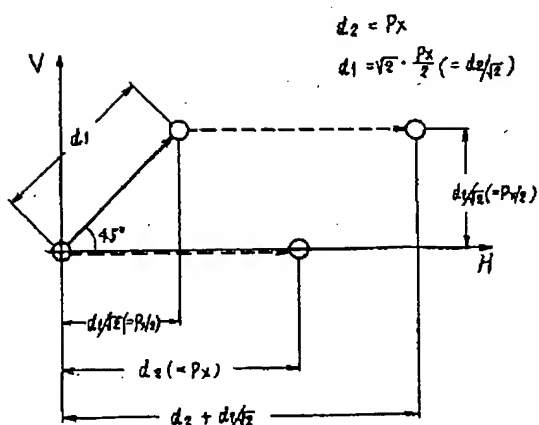
【第3図】



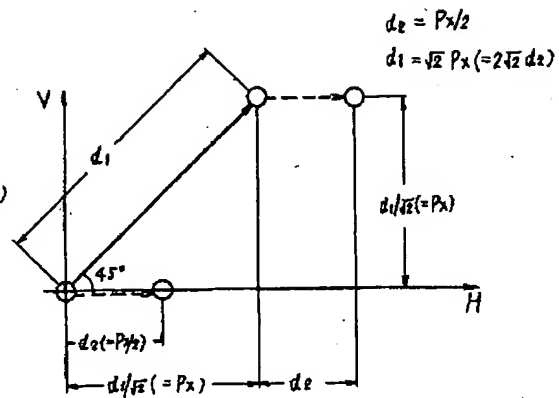
【第7図】



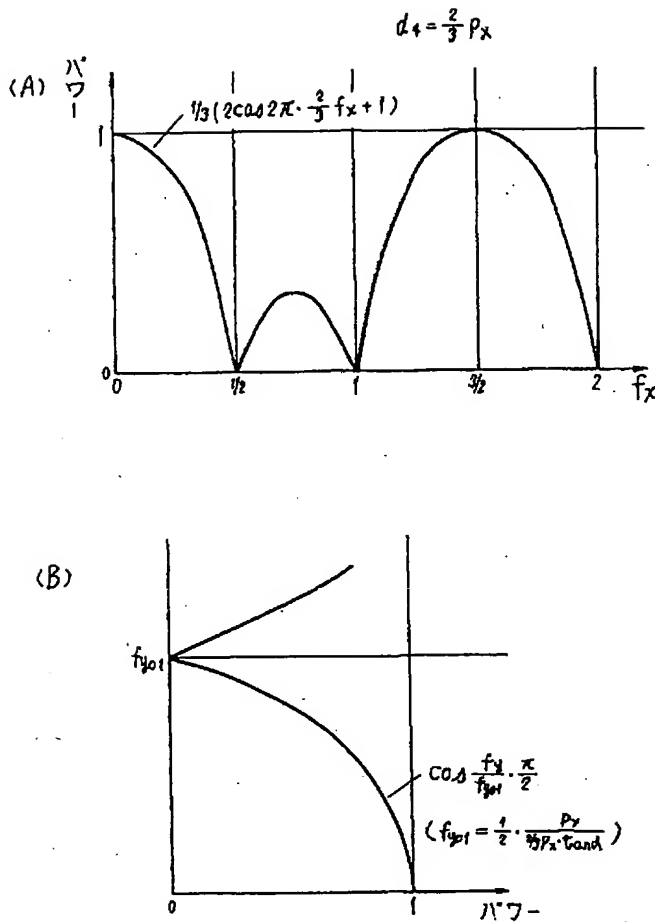
【第4図】



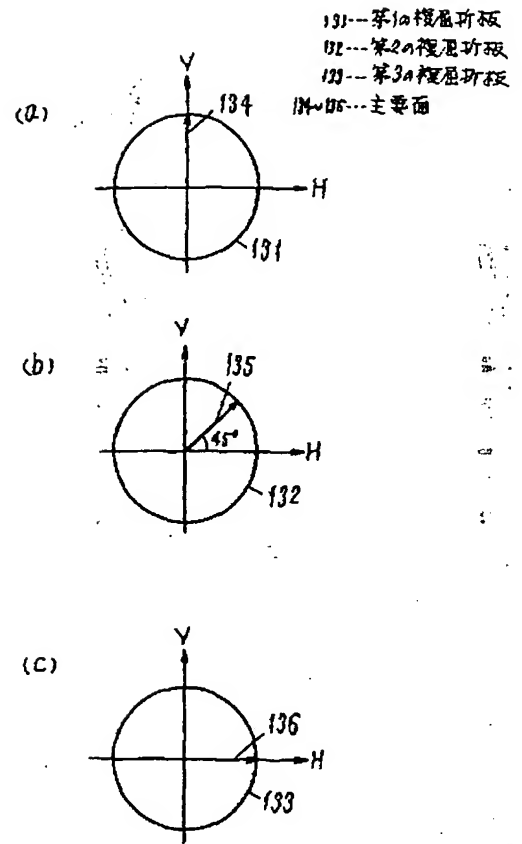
【第5図】



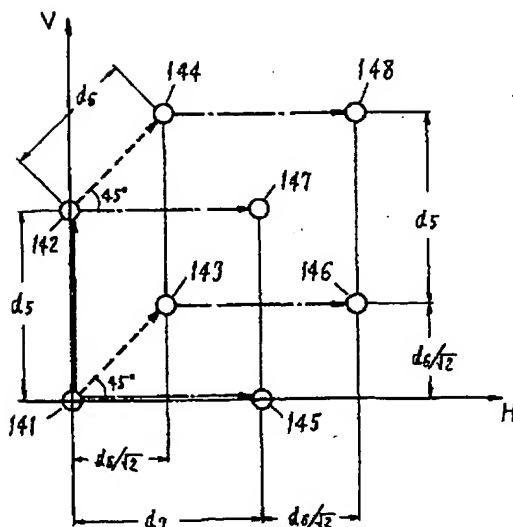
【第 10 図】



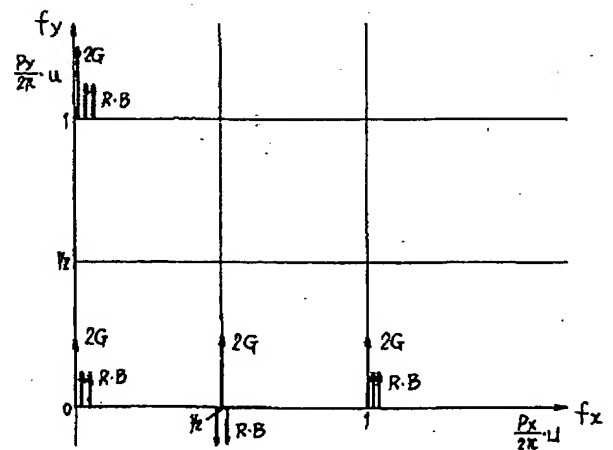
【第 13 図】



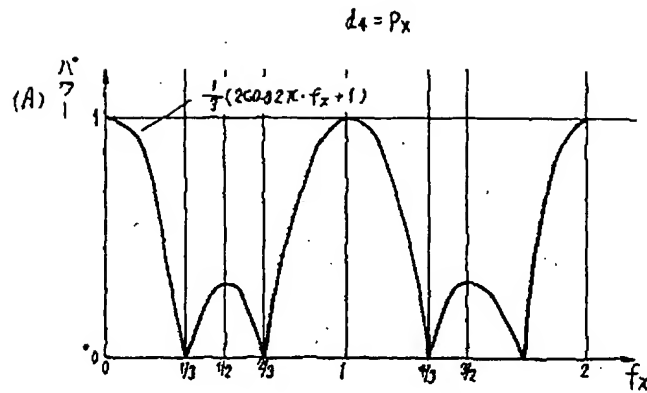
【第 14 図】



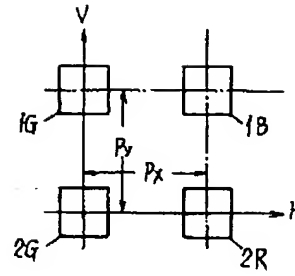
【第 18 図】



【第 11 図】



【第 17 図】



【第 23 図】

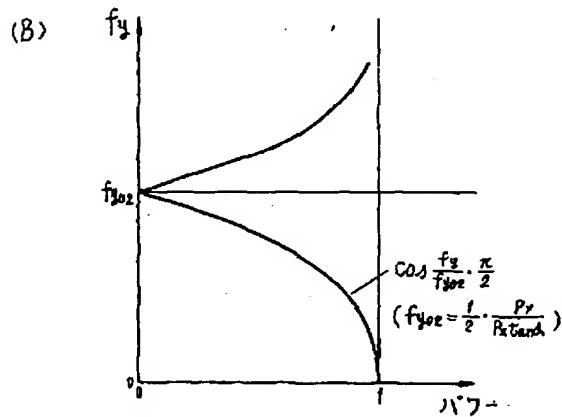
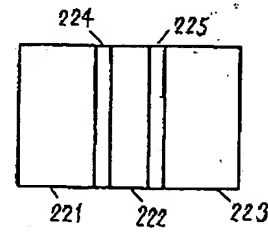
221...第1a複屈折板(水平方向に距離 $d_1 = P_x$)

222...第2a複屈折板(水平方向に距離 $d_2 = P_y/2$)

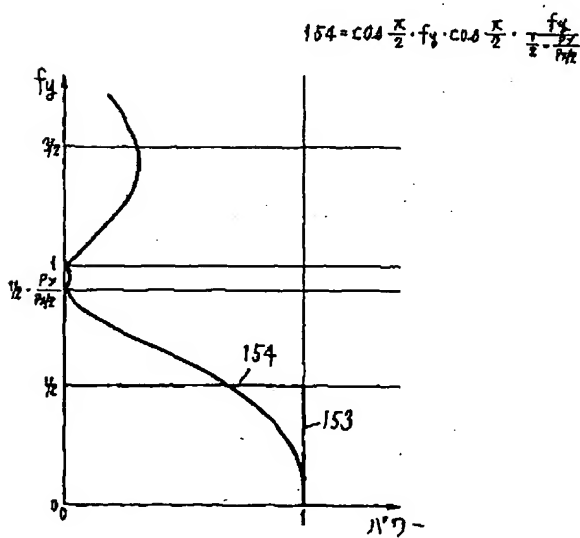
223...第1a複屈折板(垂直方向に距離 $d_3 = P_y$)

224...第1a/4位相板

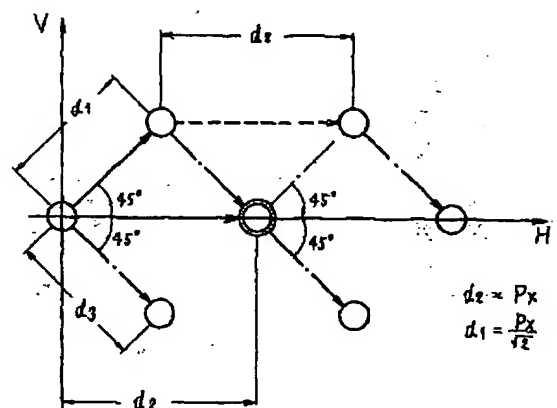
225...第2a/4位相板



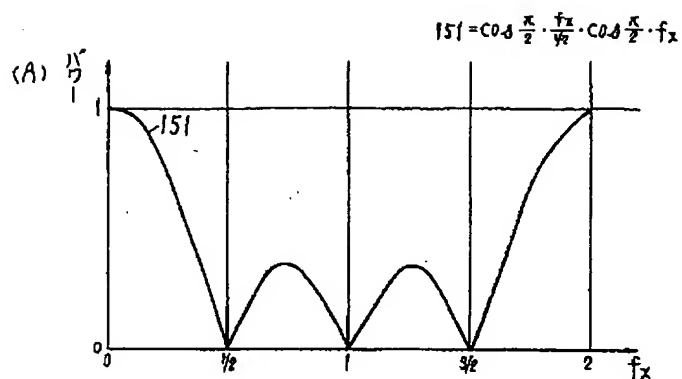
【第 16 図】



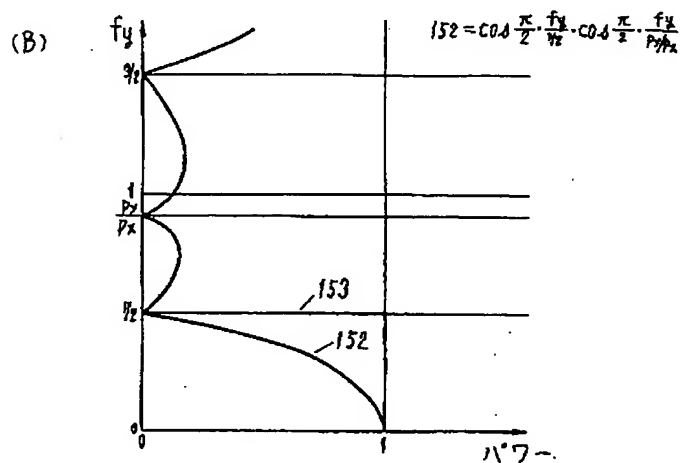
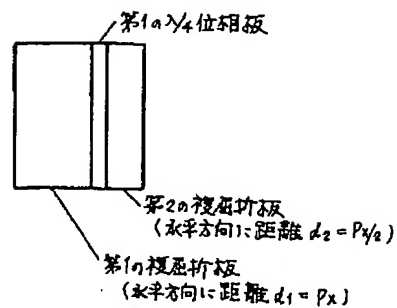
【第 20 図】



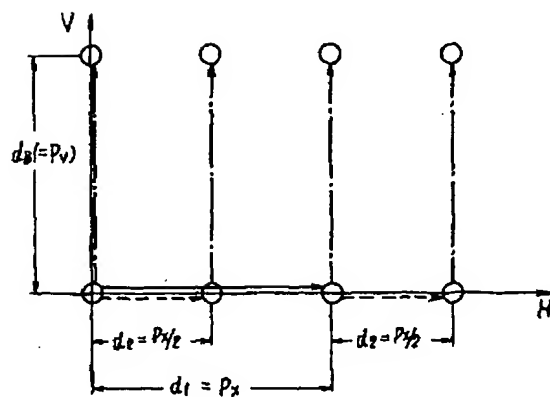
【第 15 図】



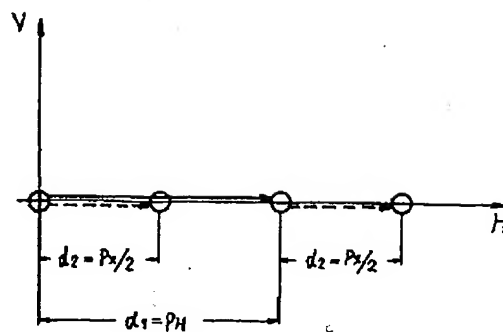
【第 26 図】



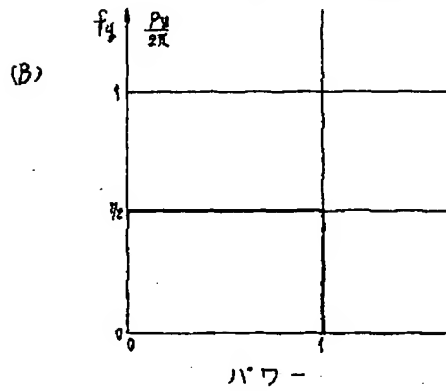
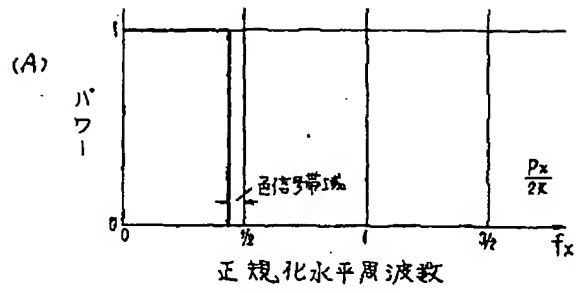
【第 24 図】



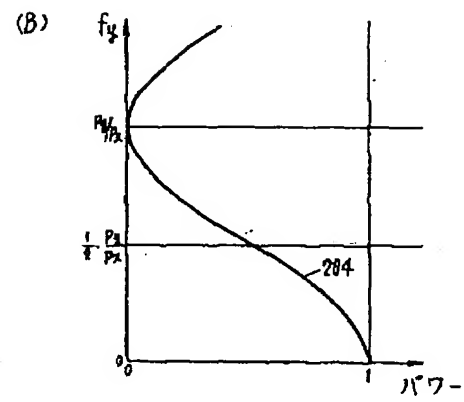
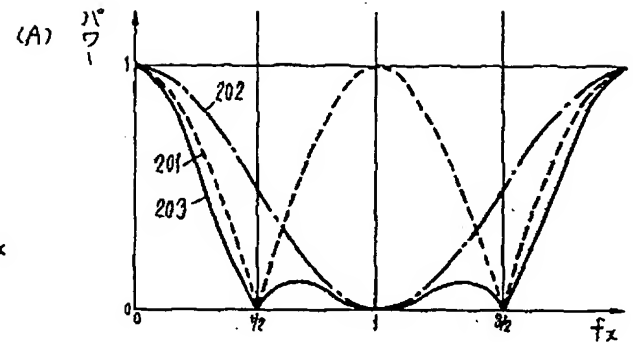
【第 27 図】



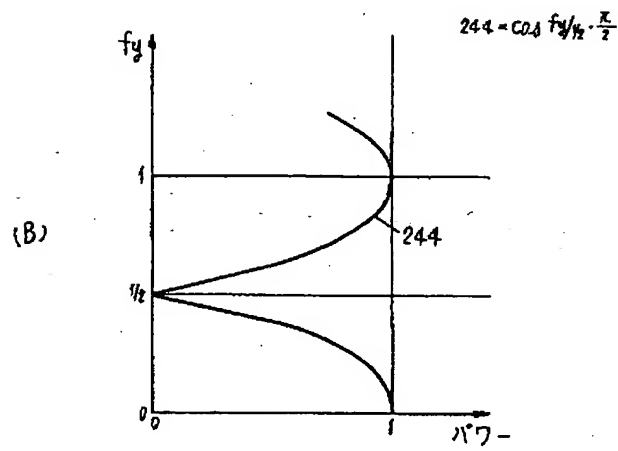
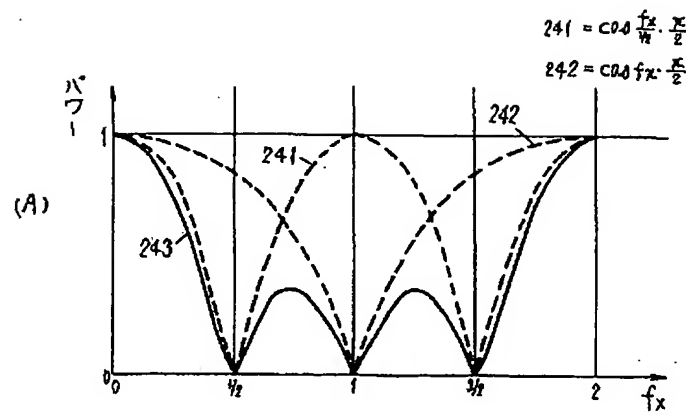
【第 19 図】



【第 21 図】



【第 2 5 図】



Date: October 20, 2003

Declaration

I, Michihiko Matsuba, President of Fukuyama Sangyo Honyaku Center, Ltd., of 16-3, 2-chome, Nogami-cho, Fukuyama, Japan, do solemnly and sincerely declare that I understand well both the Japanese and English languages and that the attached document in English is a full and faithful translation, of the copy of Japanese Patent Publication No. 2507041 published on April 2, 1996.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'm. matsuba', with a stylized flourish at the end.

Michihiko Matsuba

Fukuyama Sangyo Honyaku Center, Ltd.

OPTICAL LOW-PASS FILTER

Japanese Patent Publication No. 2507041

Published on: April 2, 1996

Application No. Hei-1-109330

Filed on: April 28, 1989

Inventor: Masaaki NAKAYAMA

Applicant: Matsushita Electric Ind.

Patent Attorney: Tomoyuki TAKIMOTO

SPECIFICATION

[TITLE OF THE INVENTION] Optical Low-Pass Filter

[WHAT IS CLAIMED IS;]

[Claim 1] An optical low-pass filter, wherein a first birefringent plate, separating an ordinary ray component and an extraordinary ray component by just a distance d_1 at an angle of substantially 45 degrees with respect to a horizontal scanning direction of a solid-state image pickup element, and a second birefringent plate, separating an ordinary ray component and an extraordinary ray component by just a distance d_2 in parallel to said horizontal scanning direction, are disposed in laminated form and the distance d_1 , the distance d_2 , and the horizontal pixel interval P_x of the solid-state

image pickup element are in the relationship:

$$d_1 \doteq P_x/\sqrt{2}$$

and in the relationship: $d_2 \doteq P_x$.

[Claim 2] An optical low-pass filter, wherein a first birefringent plate, separating an ordinary ray component and an extraordinary ray component by just a distance d_1 at an angle of substantially 45 degrees with respect to a horizontal scanning direction of a solid-state image pickup element, and a second birefringent plate, separating an ordinary ray component and an extraordinary ray component by just a distance d_2 in parallel to said horizontal scanning direction, are disposed in laminated form and the distance d_1 , the distance d_2 , and the horizontal pixel interval P_x of the solid-state image pickup element are in the relationship:

$$d_1 \doteq \sqrt{2}P_x$$

and in the relationship: $d_2 \doteq P_x/2$.

[Claim 3] An optical low-pass filter, wherein a first birefringent plate, separating an ordinary ray component and an extraordinary ray component by just a distance d_1 at an angle of substantially 45 degrees with respect to a horizontal scanning direction of a solid-state image pickup element, and a second birefringent plate, separating an ordinary ray component and an extraordinary ray component by just a distance

d_2 in parallel to said horizontal scanning direction, are disposed in laminated form and the distance d_1 and the distance d_2 are in the relationship:

$$d_1 < \sqrt{2}d_2.$$

[Claim 4] An optical low-pass filter according to Claim 3, wherein the distance d_2 and the horizontal pixel interval P_x of the solid-state image pickup element are in the relationship: $d_2 \doteq P_x$.

[Claim 5] An optical low-pass filter according to Claim 3, wherein the distance d_2 and the horizontal pixel interval P_x of the solid-state image pickup element are in the relationship: $d_2 < P_x$ and yet $d_2 \doteq P_x$.

[Claim 6] An optical low-pass filter, wherein a first birefringent plate, separating an ordinary ray component and an extraordinary ray component by just a distance d_1 at an angle of substantially 45 degrees with respect to a horizontal scanning direction of a solid-state image pickup element, and a second birefringent plate, separating an ordinary ray component and an extraordinary ray component by just a distance d_2 in parallel to said horizontal scanning direction, are disposed in laminated form and the distance d_1 and the distance d_2 are in the relationship:

$$d_2 / \sqrt{2} < d_1 < \sqrt{2}d_2.$$

[Claim 7] An optical low-pass filter according to Claim 6, wherein the distance d_2 and the horizontal pixel interval P_x of the solid-state image pickup element are in the relationship: $d_2 \doteq P_x$.

[Claim 8] An optical low-pass filter according to Claim 6, wherein the distance d_2 and the horizontal pixel interval P_x of the solid-state image pickup element are in the relationship: $d_2 < P_x$ and yet $d_2 \doteq P_x$.

[DETAILED DESCRIPTION OF THE INVENTION]

Field of the Art

This invention relates to an optical low-pass filter, which is disposed in the incidence path of a CCD or other solid-state image pickup element, performing two-dimensional sampling, in order to restrain the effects of carrier components.

Prior Arts and Themes Thereof

Fig. 17 shows a pixel alignment and aperture example of a solid-state image pickup element, and in this Figure, H indicates a horizontal scanning direction and V indicates a vertical scanning direction. At one of two adjacent horizontal lines, a green filter 1G and a blue filter 1B are disposed alternately at a pixel interval P_x in the horizontal scanning direction, and at the other horizontal line, a green

filter 2G and a red filter 2R are disposed alternately at the interval P_x . Here, the pixel interval in the vertical scanning direction is P_y .

Though subject light is sampled by such a lattice-form aperture pattern, as is clear from the sampling theorem, frequency components of frequencies of $1/2$ or more of the sampling frequency cannot be sampled and reproduced accurately in principle, and when frequency components of such higher frequencies are guided to the solid-state image pickup element, these appear as false signals.

As shown in the spatial frequency spectrum of Fig. 18, in the case of the above-described solid-state image pickup element, besides base band components (indicated by the vectors 2G, R, and B) centered at the position $(f_x = 0, f_y = 0)$, a plurality of detrimental carrier components are generated. The abscissa axis f_x and the ordinate axis f_y respectively express the horizontal frequency and the vertical frequency normalized by $P_x/2\pi$ and $P_y/2\pi$. Carrier components centered at $(f_x = 1, f_y = 0)$ give rise to a moire pattern in the case of a fine stripe pattern comprising black and white stripes extending in the vertical direction while carrier components centered at $(f_x = 1/2, f_y = 0)$ give rise to a cross color phenomenon (false color signal) in which a green or magenta

color is generated in the case of somewhat rough vertical stripes and this false signal occurs when color signals are obtained using a single panel and has the greatest influence on image quality. Carrier components centered at ($f_x = 0$, $f_y = 1$) give rise to a moire pattern in the case of fine horizontal stripes.

Thus in order to eliminate these detrimental carrier components, since horizontal frequency components of a normalized horizontal frequency of $f_x = 1/2$ or more, vertical frequency components of a normalized vertical frequency of $f_y = 1/2$ or more, and color signals centered at the point $f_y = 1/2$ in the horizontal direction are sampled from the incident light, horizontal frequency components of the frequency bandwidth of the color signal centered at the point $f_x = 1/2$ must be removed in accordance with the sampling theorem. Such ideal optical frequency characteristics are shown in Fig. 19. In this Figure, (A) shows the horizontal frequency characteristics and (B) shows the vertical frequency characteristics.

As a first prior-art example of an optical low-pass filter aimed at providing such characteristics, there is the arrangement disclosed in Japanese Unexamined Patent Publication No. Sho-60-164719. This discloses the basic art

of an optical low-pass filter comprising a first birefringent plate, separating an ordinary ray component and an extraordinary ray component at an angle close to 45 degrees with respect to a horizontal scanning direction of a solid-state image pickup element, a second birefringent plate, separating an ordinary ray component and an extraordinary ray component in parallel to the horizontal scanning direction, and a third birefringent plate, separating an ordinary ray component at an angle close to -45 degrees with respect to the horizontal scanning direction, wherein the first birefringent plate, second birefringent plate, and third birefringent plate are disposed in laminated form so that the second birefringent plate is positioned at the middle, and a single incident ray is separated into seven or eight rays, and as an embodiment, an example, wherein the distances of separation of the ordinary ray component and extraordinary ray component by the first, second, and third birefringent plates (referred to as "d₁," "d₂," and "d₃," respectively) are in the relationship: d₂ = P_x and in the relationship:

$$d_1 = d_3 = d_2/\sqrt{2},$$

is indicated. With such a prior-art optical low-pass filter, a single incident ray is separated as shown in Fig. 20, and the frequency characteristics thereof are shown in Fig. 21.

In Fig. 21, (A) shows the horizontal direction frequency characteristics, and a curve 203, obtained by synthesizing a COS curve, indicated by curve 201 in the Figure and having trap points at $f_x = 1/2, 3/2, \dots$, and a COS^2 curve, indicated by curve 202 in the Figure and having trap points at $f_x = 1, 3, \dots$, expresses the comprehensive transmittance characteristics in the horizontal direction. Also in Fig. 21, (B) shows the vertical direction frequency characteristics, and a COS^2 curve (curve 204 of the same Figure), having trap points at frequencies of odd multiples of $f_y = P_y/P_x$, expresses the transmittance characteristics in the vertical direction.

As another prior-art example of an optical low-pass filter (second prior-art example), there is the arrangement shown in Fig. 23, wherein a first birefringent plate 221, separating an ordinary ray component and an extraordinary ray component by just a distance $d_1 (= P_x)$ in the horizontal scanning direction, a second birefringent plate 222, separating an ordinary ray component and an extraordinary ray component by just a distance $d_2 (= P_x/2)$ in the horizontal scanning direction, and a third birefringent plate 223, separating an ordinary ray component and an extraordinary ray component by just a distance $d_3 (= P_y)$ in the vertical scanning direction, are laminated successively with first and second $\lambda/4$ phase plates 224 and

225 interposed, and with this optical low-pass filter of the second prior-art example, a single incident ray is separated as shown in Fig. 24 and the frequency characteristics are as shown in Fig. 25.

In Fig. 25, (A) shows the horizontal scanning direction frequency characteristics, that is, the characteristics of curve 243 of the Figure, which is obtained by synthesizing (multiplying) a COS curve (curve 241 in the Figure), having trap points at $f_x = 1/2, 3/2 \dots$, and a COS curve (curve 242 in the Figure), having trap points at $f_x = 1, 2, \dots$. Also in Fig. 25, (B) shows the vertical direction frequency characteristics, and a COS curve (curve 244 of the same Figure), having trap points at $f_y = 1/2, 3/2 \dots$ expresses the transmittance characteristics in the vertical direction. These characteristics take on values that are substantially close to the ideal characteristics shown in Fig. 19.

As yet another example of a prior-art optical low-pass filter (third prior-art example), there is an arrangement wherein, as shown in Fig. 26, the third birefringent plate and the second $\lambda/4$ phase plate of the second prior-art example shown in Fig. 23 are removed. With this third prior-art example, a single incident ray is separated as shown in Fig. 27. With regard to the frequency characteristics, whereas the horizontal

scanning direction frequency characteristics are the same as the horizontal scanning direction frequency characteristics of the second prior-art example shown in Fig. 25(A), attenuating characteristics are not exhibited in the vertical scanning direction. This third prior-art example is an example that is mainly aimed at achieving compact size and low noise while ignoring the vertical scanning direction characteristics. As with the second prior-art example, the horizontal direction frequency characteristics of this example take on values substantially close to the ideal characteristics.

Object(s) of the Invention

However, the above-described prior-art optical low-pass filters have the following problems.

The first prior-art example has mainly two problems; firstly that three quartz birefringent plates are required, thus greatly impeding the attainment of compact size and low cost. The price of an optical low-pass filter, such as those described above, is substantially proportional to the number of plates that make up the filter.

Secondly, there exist cases where the cutoff characteristics in the vertical direction are unsatisfactory as follows. That is, whereas with the horizontal direction

characteristics among the transmittance characteristics of the above-described prior-art optical low-pass filter, the frequency components that should be cut off are cut off and characteristics close to the ideal characteristics shown in Fig. 19(A) are obtained, the vertical direction characteristics have the following problems.

The separation distance in the vertical direction of the single incident ray that has been separated as shown in Fig. 20 is based on $P_x/2$ and is determined by the horizontal direction interval P_x of the pixels and not by the vertical direction interval P_y of the pixels. Thus whereas the ideal value of the transmittance characteristic trap point of the vertical direction frequency characteristics is $1/2$, the actual trap point is the vertical frequency point P_y/P_x (and odd-multiple frequencies thereof), as normalized by $P_y/2\pi$, and thus the trap points vary according to the relationship of P_x and P_y . Thus although with a solid-state image pickup element with which P_y/P_x takes on a value close to $1/2$, the necessary vertical direction transmittance characteristics are obtained with the above-described prior-art optical low-pass filter, when P_x becomes smaller than $2P_y$ and P_y/P_x takes on a value that greatly differs from $1/2$, the characteristics necessary for the solid-state image pickup element cannot be obtained. Such a

state occurs with a solid-state image pickup element with which the number of pixels in the horizontal direction is made large in order to increase the horizontal definition. That is, whereas the number of pixels n_v in the vertical direction is fixed to a value determined by the television method (approximately 500 pixels with the NTSC method and approximately 600 pixels with the PAL method) and P_y is thus fixed, P_x varies with the variation of the number of pixels n_H in the horizontal direction, and thus as n_H increases, P_y/P_x increases. For example, if with an NTSC format, the number of pixels in the horizontal direction is 670, since the vertical to horizontal ratio of the television pixels will then be 3:4 (= 500:670), $P_x = P_y$. In such a case, the vertical direction transmittance characteristics of the prior-art optical low-pass filter will be the characteristics shown by curve 211 of Fig. 22, and the difference in the low frequency region characteristics with respect to the ideal characteristics shown by curve 212 of the same Figure, which has a high probability of appearing as a subject in the cutoff frequency range, becomes large and the false signal thus becomes large. (In a case where the number of horizontal pixels is approximately 400 and small, $P_y/P_x = 3/500/4/400 = 0.6$, the characteristics in this case are as shown by curve 213 of the

same Figure, and thus the difference with respect to the ideal case at the low frequency region of the cutoff range is small and adequate characteristics are obtained with the prior-art optical low-pass filter.)

A problem of the second prior-art example is that though frequency characteristics that are substantially close to the ideal characteristics are obtained, since three birefringent plates and two $\lambda/4$ plates make up the filter and there are thus a total of five plates, the attaining of compact size and low cost, and especially the attaining of low cost is hindered.

A problem of the third prior-art example is that even though the vertical scanning direction frequency characteristics are sacrificed in an attempt to achieve low cost, the number of plates making up the filter is three and thus the cost performance balance is poor.

As described above, prior-art optical low-pass filters have a first problem that compact size and low cost are hindered and a second problem that, in a case where low cost is aimed at, the degradation of performance is large relative to the proportion of cost reduction.

Outline of the Invention

In order to resolve the above problems, a first aspect of the invention provides an optical low-pass filter comprising:

a first birefringent plate, separating an ordinary ray component and an extraordinary ray component by just a distance d_1 at an angle of substantially 45 degrees with respect to a horizontal scanning direction of a solid-state image pickup element; and a second birefringent plate, separating an ordinary ray component and an extraordinary ray component by just a distance d_2 substantially in parallel to the abovementioned horizontal scanning direction; wherein the abovementioned first and second birefringent plates are disposed in laminated form.

A second aspect of the invention provides an optical low-pass filter comprising: a first birefringent plate, separating an ordinary ray component and an extraordinary ray component by just a distance d_3 at an angle of substantially

$$\sin^{-1} 1/\sqrt{3}$$

with respect to a horizontal scanning direction of a solid-state image pickup element; and a second birefringent plate, separating an ordinary ray component and an extraordinary ray component by just a distance d_4 substantially in parallel to the abovementioned horizontal scanning direction; wherein the abovementioned first and second birefringent plates are disposed in laminated form.

A third aspect of the invention provides an optical low-pass

filter comprising: a first birefringent plate, separating an ordinary ray component and an extraordinary ray component by just a distance d_5 substantially perpendicular to the abovementioned horizontal scanning direction; a second birefringent plate, separating an ordinary ray component and an extraordinary ray component by just a distance d_6 at an angle of substantially 45 degrees with respect to a horizontal scanning direction of a solid-state image pickup element; and a third birefringent plate, separating an ordinary ray component and an extraordinary ray component by just a distance d_7 substantially in parallel to the abovementioned horizontal scanning direction; wherein the abovementioned first, second, and third birefringent plates are disposed in laminated form so that the abovementioned second birefringent plate is positioned at the middle.

Actions

The present invention provides optical low-pass filters of the above arrangements to achieve compact size and low cost and to achieve not only horizontal direction but also vertical direction frequency characteristics that are close in values to the ideal characteristics even when the horizontal pixel interval P_x and vertical pixel interval P_y of a solid-state image pickup element are in a relationship in which the value

of P_y/P_x differs greatly from $1/2$ and thereby realize a solid-state image pickup element that is low in the generation of false signals.

Preferred Embodiments

This invention shall now be described with reference to the drawings. Fig. 1 is used for describing the optical characteristics of a first birefringent plate 11 and a second birefringent plate 12 of an embodiment of the first aspect of the invention. In this Figure, incident light is supplied via a lens to birefringent plates 11 and 12 in the direction orthogonal to the paper surface of the Figure. Birefringent plate 11 separates the incident light into an ordinary ray and an extraordinary ray, and a principle plane 13, in which these ordinary and extraordinary rays exist and which extends perpendicular to the paper surface of the Figure, forms an angle of substantially 45 degrees with respect to a horizontal scanning direction H. With birefringent plate 12, a principal plane 14, in which the ordinary ray and extraordinary ray exist, substantially coincides with the horizontal scanning direction. These two birefringent plates 11 and 12 are laminated and disposed inside the incident light path so that the first or the second birefringent plate is set at the position closest to a solid-state image pickup element. In

the description that follows, it shall be deemed that the second birefringent plate is disposed at the position closest to the solid-state image pickup element. The angle formed mutually by the principle planes of the two birefringent plates 11 and 12 is a relative angle and this angle may be measured clockwise or counterclockwise.

The general solutions of the separation distance by which the incident light is separated by the two birefringent plates of the present embodiment shall now be described.

If d_1 is the separation distance of the ordinary ray and extraordinary ray by the first birefringent plate, d_2 is the separation distance of the ordinary ray and extraordinary ray by the second birefringent plate, and these satisfy the condition:

$$d_2 / \sqrt{2} < d_1 < \sqrt{2}d_2$$

the result of separation of incident light by the above-described combination of the two birefringent plates will be as shown in Fig. 2. That is, the single ray of light that is made incident at the origin of Fig. 2 is separated by first birefringent plate 11 by just the distance d_1 in the direction of 45 degrees with respect to the horizontal scanning direction (indicated by the solid line arrow in Fig. 2) and becomes two light rays of equal intensity, respectively. These light rays

are then separated respectively by second birefringent plate 12 by just the distance d_2 in parallel to the horizontal scanning direction (indicated by the broken line arrows in Fig. 2), and in the final stage, are separated into the four light rays 21 to 24 of equal intensity, respectively, as shown in Fig. 2.

This optical low-pass filter has, in the horizontal direction, the frequency characteristics of the product of the frequency characteristics of a COS curve, having trap points at points of odd multiples of the horizontal frequency, $1/2 \cdot P_x/d_2 (= f_{x01})$, as normalized by $P_x/2\pi$, and the frequency characteristics of a COS curve having trap points at points of odd multiples of

$$1/2 \cdot P_x/d_2\sqrt{2} (= f_{x02}),$$

and has, in the vertical direction, the frequency characteristics of a COS curve having trap points at points of odd multiples of

$$1/2 \cdot P_y/d_1\sqrt{2} (= f_{y01}).$$

That is, this embodiment's low-pass filter has the horizontal direction frequency characteristics of $\text{COS} \cdot f_x/f_{x01} \cdot \pi/2 \times \text{COS} \cdot f_x/f_{x02} \cdot \pi/2$ and has the frequency characteristics of $\text{COS} \cdot f_y/f_{y01} \cdot \pi/2$ in the vertical direction.

Next for this embodiment, the characteristics for the case where d_1 and d_2 are determined so as to provide desirable

horizontal and vertical frequency characteristics when P_x and P_y are substantially equal as was referred to in the section on the issues of the first prior-art example shall be described.

Here, if

$$d_2 = P_x \text{ and } d_1/\sqrt{2} = 2/3 \cdot P_x$$

(thus

$$d_1 = 2\sqrt{2}/3 \cdot d_2 = 0.943d_2,$$

which greatly differs from

$$d_1 = d_2/\sqrt{2} = 0.707d_2$$

of the first prior-art example), then $f_{0x1}=1/2 \cdot f_{0x2}=1.5/2$, $f_{0y2}=1.5/2$, and the horizontal direction frequency characteristics become the characteristics of curve 33, obtained by synthesizing the curve of $\cos f_x/f_{x01} \cdot \pi/2$, indicated as curve 31 in Fig. 3(A), and the curve of $\cos f_x/f_{x02} \cdot \pi/2$, indicated as curve 32, and thus cutoff characteristics close to the ideal characteristics indicated by curve 30 (the curve of Fig. 19(A) is drawn again) are obtained like the characteristics of the first prior-art example

$$(d_2 = P_x \text{ and } d_1 = d_2/\sqrt{2}),$$

shown as curve 203 in Fig. 21(A).

Also, the vertical characteristics are the characteristics shown by curve 34 in Fig. 3(B) and are thus close to the characteristics of the prior-art example shown as curve 36 in

the same Figure (curve 204 of Fig. 21 is drawn again).

The general solutions of the above example shall now be discussed. This invention is not limited to the relationship:

$$d_1 = d_2/\sqrt{2} = P_x/\sqrt{2}$$

as in the prior-art example (first prior-art example) and thus f_{x01} , f_{x02} , and f_{y01} are not fixed so that $f_{x01}=2 \cdot f_{x02}$, and $f_{y01}=P_y/P_x \cdot 2f_{x01}$. Instead, d_1 is determined in consideration of the value of P_y as well and values are set to satisfy $f_{x01} < f_{x02} < 2 \cdot f_{x01}$ so that $f_{y01} = P_y/P_x \cdot f_{x02} < P_y/P_x \cdot 2f_{x01}$ will hold, and though the values of the vertical direction frequency characteristics will differ somewhat from the ideal characteristics as in the first prior-art example, substantially good characteristics can be obtained for both the horizontal and vertical frequency characteristics with an arrangement with fewer plates than the first prior-art example.

As a general solution, the preferable range for the value of d_1 is as follows. That is, since when f_{x02} is set to a value smaller than f_{x01} , the horizontal direction frequency characteristics will be such that the characteristics degrade (the transmitted power becomes too small) within a range of frequencies that should be transmitted, it is realistic to set values so that $1/2 = f_{x01} < f_{x02}$.

In terms of d_1 , d_2 , and P_x , this condition can be rewritten

as:

$$d_1 < \sqrt{2}d_2 = \sqrt{2}P_x$$

Also as was described in the section on the prior arts, since problems occur when $f_{x02} = 2 \cdot f_{x01}$ as in the prior-art example and thus $f_{x02} < 2 \cdot f_{x01}$ must be made to hold, the preferable relationship of d_1 , d_2 , and P_x that includes this relationship will be:

$$d_2/\sqrt{2} < d_1 < \sqrt{2}d_2 = \sqrt{2}P_x$$

Though in the above description an example where $d_1 = P_x$, and thus $f_{x01} = 1/2$ was described, since when f_{x02} becomes too close to f_{x01} in this case, the horizontal direction transmission characteristics degrade (the transmitted power decreases) too much, the value of f_{x01} is made slightly greater than $1/2$ (and thus d_2 is made slightly less than P_x) to prevent this degradation without degrading the cutoff characteristics by much.

Figs. 4 and 5 are diagrams showing the manner of separation of incident light in second and third embodiments, respectively, of the first aspect of the invention. With the example of Fig. 4, $d_2 = P_x$ and

$$d_1/\sqrt{2} = P_x/2$$

are satisfied with the same arrangement as that of the first embodiment, and the frequency characteristics in the

horizontal scanning direction are the characteristics of curve 61 shown in Fig. 6(A), which is obtained by multiplying a COS curve, having trap points at points of odd multiples of the horizontal frequency of $1/2$ as normalized by $P_x/2\pi$, and a COS curve, having trap points at points of odd multiples of 1 , and thus substantially satisfactory characteristics are obtained. The frequency characteristics in the vertical scanning direction are given by a COS curve (curve 62 of Fig. 6(B)), having trap points at odd multiples of the vertical frequency of $1/2P_y/P_x/2$ as normalized by $P_y/2\pi$, so that substantially satisfactory characteristics can be obtained with an image pickup element for which $P_y/P_x/2 = 1$, and this arrangement can be used adequately even in an image pickup element that does not satisfy the above relationship as long as the deviation of the vertical scanning direction characteristics from the ideal characteristics can be tolerated since the horizontal scanning direction characteristics will be substantially ideal characteristics.

The example of Fig. 5 is a third embodiment, wherein $d_2 = P_x/2$ and

$$d_1/\sqrt{2} = P_x$$

are satisfied with the same arrangement as that of the first embodiment, and the frequency characteristics in the

horizontal scanning direction are the same as those of the second embodiment and are the characteristics shown by curve 61 of Fig. 6(A). The frequency characteristics in the vertical scanning direction exhibit a COS curve (curve 63 of Fig. 6(B)), having trap points at odd multiples of the vertical frequencies of $1/2 \cdot P_y/P_x$ as normalized by $P_y/2\pi$, and substantially satisfactory characteristics can thus be obtained with an image pickup element for which $P_y/P_x = 1$.

As described above, with the first aspect of the invention, substantially satisfactory characteristics can be obtained with an optical low-pass filter with a simple arrangement having just two birefringent plates. At least with regard to the horizontal scanning direction frequency characteristics, characteristics that are close to ideal can be obtained regardless of the ratio of the horizontal scanning direction pixel interval P_x and the vertical scanning direction pixel interval P_y .

Next, an embodiment of the second aspect of the invention shall be described with reference to the drawings. Fig. 7 is used for describing the optical characteristics of a first birefringent plate 71 and a second birefringent plate 72 of this embodiment. In this Figure, incident light is supplied via a lens to birefringent plates 71 and 72 in the direction

orthogonal to the paper surface of the Figure. Birefringent plate 71 separates the incident light into an ordinary ray and an extraordinary ray, and a principle plane 73, in which these ordinary and extraordinary rays exist and which extends perpendicular to the paper surface of the Figure, forms an angle of substantially

$$\sin^{-1}1/\sqrt{3} \text{ degrees } (= 35.3 \text{ degrees})$$

with respect to a horizontal scanning direction H. With birefringent plate 72, a principal plane 74, in which the ordinary ray and extraordinary ray exist, substantially coincides with the horizontal scanning direction. These two birefringent plates 71 and 72 are laminated and are disposed inside the incident light path so that the first or the second birefringent plate is set at the position closest to a solid-state image pickup element. In the description that follows, it shall be deemed that the second birefringent plate is disposed at the position closest to the solid-state image pickup element. The angle formed mutually by the principle planes of the two birefringent plates 71 and 72 is a relative angle and this angle may be measured clockwise or counterclockwise.

A description shall now be provided concerning the separation distance by which the incident light is separated

by the two birefringent plates of the present embodiment and the intensities of the separated light rays.

If d_3 is the separation distance of the ordinary ray and extraordinary ray by the first birefringent plate, the single light ray incident on the origin of Fig. 8 is separated by just the distance d_3 in the direction of:

$$\sin^{-1}1/\sqrt{3} \text{ degrees } (= 35.3 \text{ degrees})$$

with respect to the horizontal scanning direction (indicated by the solid line arrow in Fig. 8) and becomes two light rays 81 and 82 of equal intensity, respectively. These two light rays are then made incident on second birefringent plate 72 and the extraordinary ray component and the ordinary ray component become as follows. Firstly, since light ray 81 is the ordinary ray component at first birefringent plate 71, it is just the component that vibrates perpendicular to principal plane 73 (vector E_1 of light ray 81 in Fig. 8). Thus of the light ray 81, the component that becomes the ordinary component with respect to second birefringent plate 72 is the component, $E_1 \cos \beta$, which vibrates perpendicular to principal plane 74 of second birefringent plate 72, and the component that becomes the extraordinary component is the component, $E_1 \sin \beta$, which vibrates parallel to principal plane 74. Also, since light ray 82 is the extraordinary ray component at first birefringent

plate 71, it is just the component that vibrates parallel to principal plane 73 (vector O_1 of light ray 82 in Fig. 8). Thus as with light ray 81, of the light ray 82, the component that becomes the ordinary component with respect to second birefringent plate 72 is the component, $E_1 \sin \beta$, and the component that becomes the extraordinary component is the component, $E_1 \cos \beta$. Since the vector amplitudes O_1 and E_1 of light rays 81 and 82 are equal and since the vector sum,

$$\sqrt{O_1^2 + E_1^2},$$

is matched with the incident light, if the intensity of the incident light is 1, the intensity of each of the extraordinary and ordinary rays is clearly:

$$1/\sqrt{2}.$$

Thus when the abovementioned two light rays 81 and 82 are separated into the ordinary ray components and extraordinary components by just the distance d_2 ($d_2 = d_1 \cos \alpha$) in the horizontal scanning direction by second birefringent plate 72, they become the four light rays 91 to 94 as shown in Fig. 9. The respective intensities, in other words, the respective energies are expressed as the square of the respective vector amplitudes, and thus the energy of light ray 91 is:

$(1/\sqrt{2} \cdot \cos \beta)^2$; that of light ray 92 is: $(1/\sqrt{2} \cdot \sin \beta)^2$;
that of light ray 93 is:

$(1/\sqrt{2} \cdot \sin\beta)^2$; and that of light ray 94 is: $(1/\sqrt{2} \cdot \cos\beta)^2$; and since the angle β is selected so that:

$$\sin\beta = 1/\sqrt{3} \text{ and } \cos\beta = \sqrt{2/3},$$

the respective intensities are 1/3, 1/6, 1/6, and 1/3.

Thus the frequency characteristics of this optical low-pass filter are $1/3(2\cos^2\pi \cdot f_1/P_x/d_4 + 1)$ in the horizontal scanning direction and $\cos\pi/2 \cdot f_y/f_{y01}$ ($f_{y01} = 1/2 \cdot P_y/d_3 \sin\alpha = 1/2 \cdot P_y/d_4 \tan\alpha$) in the vertical scanning direction.

Fig. 10 shows the frequency characteristics of an optical low-pass filter with the arrangement of the above-described second aspect of the invention for which $d_4 = 2/3P_x$,

$$d_3 = \sqrt{3/2} \cdot 2/3P_x, \text{ and } \beta = \sin^{-1}1/\sqrt{3}.$$

(A) of this Figure shows the horizontal scanning direction frequency characteristics, which exhibit the curve, $1/3(2 \cdot \cos^2\pi \cdot 2/3f_x + 1)$. With these characteristics, though the cutoff characteristics are poor when f_x is 1 or greater, substantially good characteristics are obtained when f_x is 1 or less and if it is considered that, besides the optical low-pass filter, a photographing lens also provides an optical low-pass effect (that is, the high-frequency region cannot be resolved due to lens aberration, etc.), the characteristics are adequately useable. Also, (B) of the same Figure shows the vertical scanning direction frequency characteristics,

which exhibit the curve,

$$\cos \pi/2 \cdot f_y/f_{y02} (f_{y02}=1/2 \cdot P_y/2/3 \cdot P_x \cdot \tan \alpha = 1/2 \cdot P_y/2/3 \sqrt{2} \cdot P_x).$$

These characteristics provide nearly ideal characteristics when

$$P_y = 2/3 \sqrt{2} P_x.$$

Likewise, Fig. 11 shows the frequency characteristics of an optical low-pass filter with the arrangement of the above-described second aspect of the invention for which $d_4 = P_x$,

$$d_3 = \sqrt{3}/2 \cdot P_x, \text{ and } \beta = \sin^{-1} 1/\sqrt{3}.$$

(A) of this Figure shows the horizontal scanning direction frequency characteristics, which exhibit the curve, $1/3(2 \cdot \cos 2\pi \cdot f_x + 1)$, having trap points at $f_x = 1/3$ and $2/3$. Such characteristics are the characteristics required of an optical low-pass filter for a solid-state image-pickup element provided with a color filter in which one color is repeated at every three pixels in the horizontal scanning direction of the image pickup element, for example as shown in Fig. 12, and can be used in such an image pickup device. With the example of Fig. 12, 12 red (R), green (G), and blue (B) color filters are disposed according to the respective pixels in the horizontal scanning direction and a filter of one color is allocated to one pixel each in the horizontal scanning

direction (in other words, the width of one color of a color filter is equal to the pixel interval P_x in the horizontal scanning direction). Also, Fig. 11(B) shows the vertical scanning direction frequency characteristics, which exhibit the curve,

$$\cos \pi/2 \cdot f_y/f_{y02} (f_{y02}=1/2 \cdot P_y/P_x \cdot \tan \alpha = 1/2 \cdot P_y/P_x/\sqrt{2}).$$

These characteristics provide nearly ideal characteristics when

$$P_y = P_x/\sqrt{2}.$$

As described above, the second aspect of the invention also provides substantially satisfactory characteristics with an optical filter of a simple arrangement with just two birefringent plates. At least with regard to the horizontal scanning direction frequency characteristics, characteristics that are close to ideal can be obtained regardless of the ratio of the horizontal scanning direction pixel interval P_x and the vertical scanning direction pixel interval P_y .

An embodiment of the third aspect of the invention of the present invention shall now be described with reference to the drawings. Fig. 13 is used for describing the optical characteristics of a first birefringent plate 131, a second birefringent plate 132, and a third birefringent plate 133 of

this embodiment. In this Figure, incident light is supplied via a lens to birefringent plates 131, 132, and 133 in the direction orthogonal to the paper surface of the Figure. Birefringent plate 131 separates the incident light into an ordinary ray and an extraordinary ray, and a principle plane 134, in which these ordinary and extraordinary rays exist and which extends perpendicular to the paper surface of the Figure, forms an angle of substantially 90 degrees with respect to a horizontal scanning direction H. With birefringent plate 132, a principal plane 135, in which the ordinary ray and extraordinary ray exist, forms an angle of substantially 45 degrees with respect to the horizontal scanning direction. With birefringent plate 133, a principal plane 136 substantially coincides with the horizontal scanning direction H. These three birefringent plates 131, 132, and 133 are laminated so that second birefringent plate 132 is positioned at the middle and are disposed inside the incident light path so that the first or the third birefringent plate is set at the position closest to a solid-state image pickup element. In the description that follows, it shall be deemed that the third birefringent plate is disposed at the position closest to the solid-state image pickup element. The angles formed mutually by the principle planes of the three

birefringent plates 131, 132 and 133 are relative angles and these angles may be measured clockwise or counterclockwise.

The general solutions of the separation distances by which the incident light is separated by the three birefringent plates of the present embodiment shall now be described.

If d_5 is the separation distance of the ordinary ray and extraordinary ray by the first birefringent plate, d_6 is the separation distance of the ordinary ray and extraordinary ray by the second birefringent plate, and d_7 is the separation distance of the ordinary ray and extraordinary ray by the third birefringent plate, the result of separation of incident light by the above-described combination of the three birefringent plates will be as shown in Fig. 14. That is, the single ray of light that is made incident at the origin of Fig. 14 is separated by first birefringent plate 131 by just the distance d_5 in the direction of 90 degrees with respect to the horizontal scanning direction (indicated by the solid line arrow in Fig. 14) and becomes two light rays of equal intensity, respectively. These light rays are then separated respectively by second birefringent plate 132 by just the distance d_6 in the direction of 45 degrees with respect to the horizontal scanning direction (indicated by the broken line arrows in Fig. 14) and become four light rays of equal intensity, respectively. These four

light rays are then separated respectively by third birefringent plate 133 by just the distance d_7 in parallel to the horizontal scanning direction (indicated by the alternate long and short dash line arrows in Fig. 14), and in the final stage, are separated into the eight light rays 141 to 148 of equal intensity, respectively, as shown in Fig. 14.

This optical low-pass filter has the frequency characteristics of the product of the frequency characteristics of a COS curve, having trap points at points of odd multiples of the horizontal frequency $1/2 \cdot P_x/d_7$ ($= f_{x01}$) as normalized by $P_x/2\pi$, and the frequency characteristics of a COS curve, having trap points at points of odd multiples of

$$1/2 \cdot P_x/d_6/\sqrt{2} \quad (= f_{x02}),$$

and has, in the vertical direction, the frequency characteristics of the product of the frequency characteristics of a COS curve, having trap points at points of odd multiples of the vertical frequency $1/2 \cdot P_y/d_5$ ($= f_{y01}$) as normalized by $P_y/2\pi$, and the frequency characteristics of a COS curve, having transition trap points at points of odd multiples of

$$1/2 \cdot P_y/d_6/\sqrt{2} \quad (= f_{y02}).$$

That is, this embodiment's low-pass filter has the horizontal direction frequency characteristics of $\text{COS} \cdot f_x/f_{x01} \cdot \pi/2 \times$

$\cos f_x/f_{x02} \cdot \pi/2$ and has the frequency characteristics of $\cos f_x/f_{y01} \cdot \pi/2 \times \cos f_y/f_{y01} \cdot \pi/2$ in the vertical direction.

Fig. 15 shows the frequency characteristics of an optical low-pass filter of the above-described third aspect of the invention for which $d_7 = P_x$,

$$d_6 = P_x/\sqrt{2}, \text{ and } d_5 = P_y.$$

In other words, the frequency characteristics when $f_{x01} = 1/2$, $f_{x02} = 1$, $f_{y01} = 1/2$ and $f_{y02} = P_y/P_x$ are shown. Curve 151 of (A) of this Figure shows the horizontal scanning direction frequency characteristics and these are good characteristics that are exactly the same as the characteristics of the third prior-art example (the curve of Fig. 25(A)).

Curve 152 of Fig. 15(B) shows the vertical scanning direction frequency characteristics and these are good characteristics that are extremely close to the ideal characteristics, indicated by curve 153 in the same Figure (the curve of Fig. 19(B) is drawn again), more so than the characteristics of the third prior-art example (the curve of Fig. 25(B)).

Likewise, Fig. 16 shows the frequency characteristics of an optical low-pass filter of the above-described third aspect of the invention for which $d_7 = P_x$,

$$d_6 = P_x/\sqrt{2},$$

and $d_5 = P_y/2$. In other words, the vertical scanning direction

frequency characteristics when $f_{x01} = 1/2$, $f_{x02} = 1$, $f_{y01} = 1$ and $f_{y02} = P_y/P_x$ are shown. With this example, for the case where the energies of the transmitted bandwidth are lowered excessively with the above-described first embodiment of the third aspect of the invention, the attenuation characteristics of the cutoff bandwidth is sacrificed slightly to improve the attenuation characteristics of the transmitted bandwidth. The horizontal scanning direction frequency characteristics of this embodiment are the same as those of the first embodiment shown in Fig. 15(A).

With the above example, when $P_x = P_y$, the following holds:

$$f_{y02} = 1 \text{ (since } f_{x02} = 1 \text{ due to } d_6 = P_x/\sqrt{2}) ;$$

and thus both f_{x02} and f_{y02} can be made close to ideal values, and if $P_x \neq P_y$, both f_{x02} and f_{y02} can be made to have balanced values so as to provide good frequency characteristics in both the horizontal scanning direction and vertical scanning direction by making the following hold:

$$d_6 = (P_x + P_y) / 2\sqrt{2}.$$

As described above, with the third aspect of the invention, frequency characteristics can be determined independently for both the horizontal scanning direction and the vertical scanning direction with an arrangement of just three birefringent plates, and characteristics that are close to

ideal can be obtained for both directions regardless of the ratio of the horizontal scanning direction pixel interval P_x and the vertical scanning direction pixel interval P_y . For example, in comparison to the second prior-art example, which provides the best characteristics among the prior-art examples, whereas the prior-art example is a five-plate arrangement including $\lambda/4$ phase plates, the arrangement of this invention is fewer in the number of component plates and yet more improved in characteristics.

Effect(s) of the Invention

As described above, with the present invention, an optical low-pass filter of a performance equivalent to or better than prior-art examples can be provided with a fewer number of plates in comparison to the prior-art examples and can thus enable the attainment of compact size, reduced cost, and improved performance.

[BRIEF DESCRIPTION OF THE DRAWINGS]

Fig. 1 shows schematic arrangement drawings used for describing the optical characteristics of the respective birefringent plates used in an embodiment of the first aspect of the invention, Fig. 2 is an explanatory diagram showing the manner in which incident light is separated by the first embodiment of the first aspect of the invention, Fig. 3 shows

characteristics diagrams of the general solutions of the optical characteristics of the first aspect of the invention, Figs. 4 and 5 are explanatory diagrams showing the manner in which incident light is separated by the second and third embodiments of the first aspect of the invention, Fig. 6 shows optical frequency characteristics diagrams of the aforementioned embodiments, Fig. 7 shows schematic arrangement drawings for providing optical descriptions of the birefringent plates used in an embodiment of the second aspect of the invention, Figs. 8 and 9 are explanatory diagrams showing the manner in which incident light is separated by this invention, Figs. 10 and 11 are optical frequency characteristics diagrams of the first and second embodiments of this invention, Fig. 12 is an arrangement diagram of a solid-state image pickup element color filter that is suitable for application of the optical low-pass filter of the second embodiment of this invention, Fig. 13 shows schematic arrangement drawings used for providing optical descriptions of the respective birefringent plates used in an embodiment of the third aspect of the invention, Fig. 14 is an explanatory diagram showing the manner in which incident light is separated by this invention, Figs. 15 and 16 are optical frequency characteristics diagrams of the first and second embodiments

of this invention, Fig. 17 is an enlarged plan view of an example of an aperture pattern of a CCD solid-state image pickup element to which this invention is applied, Fig. 18 is a spatial frequency spectrum diagram obtained by this CCD solid-state image pickup element, Fig. 19 shows characteristics diagrams of ideal characteristics of an optical low-pass filter that is necessary for this CCD solid-state image pickup element, Fig. 20 is an explanatory diagram showing the manner of light ray separation by an optical low-pass filter of the first prior-art example, Figs. 21 and 22 are frequency characteristics diagrams of the optical low-pass filter of this prior-art example, Figs. 23 and 26 are schematic arrangement diagrams of optical low-pass filters of the second and third prior-art examples, respectively, Fig. 24 and 27 are explanatory diagrams showing the manner of light ray separation by these prior-art optical low-pass filters, and Fig. 25 shows frequency characteristics diagrams of the optical low-pass filters of these prior-art examples.

11 --- first birefringent plate, 12 --- second birefringent plate, 13, 14 --- principal plane, 71 --- first birefringent plate, 72 --- second birefringent plate, 73, 74 --- principal plane, 131 --- first birefringent plate, 132 --- second

birefringent plate, 133 --- third birefringent plate, 134, 135,
136 --- principal plane.

Fig.1

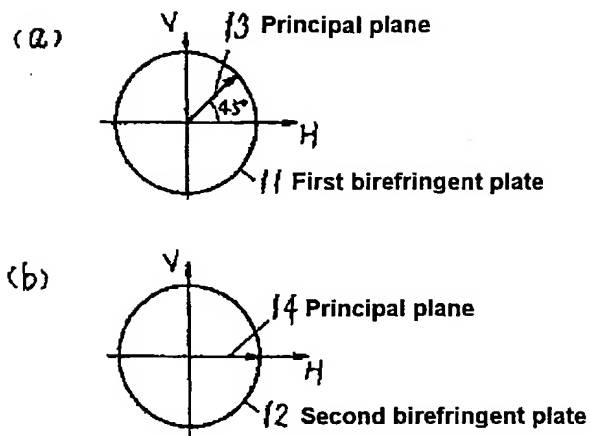


Fig.2

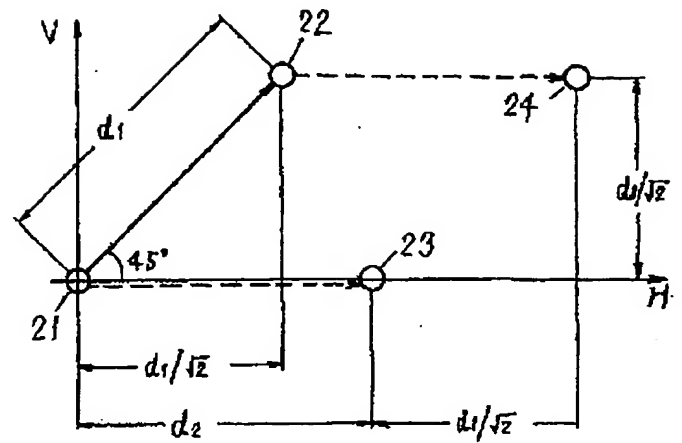


Fig.19

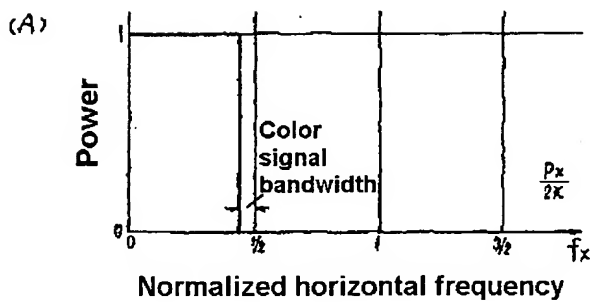


Fig.21

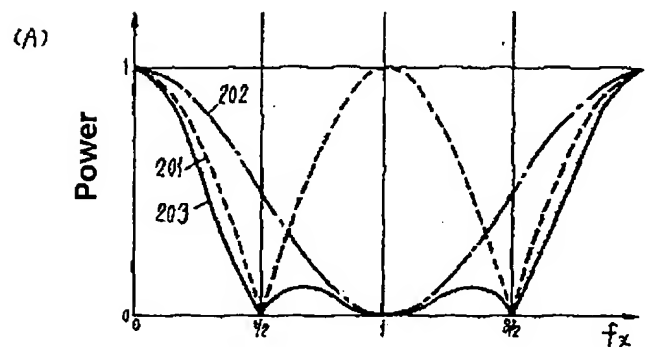


Fig.3

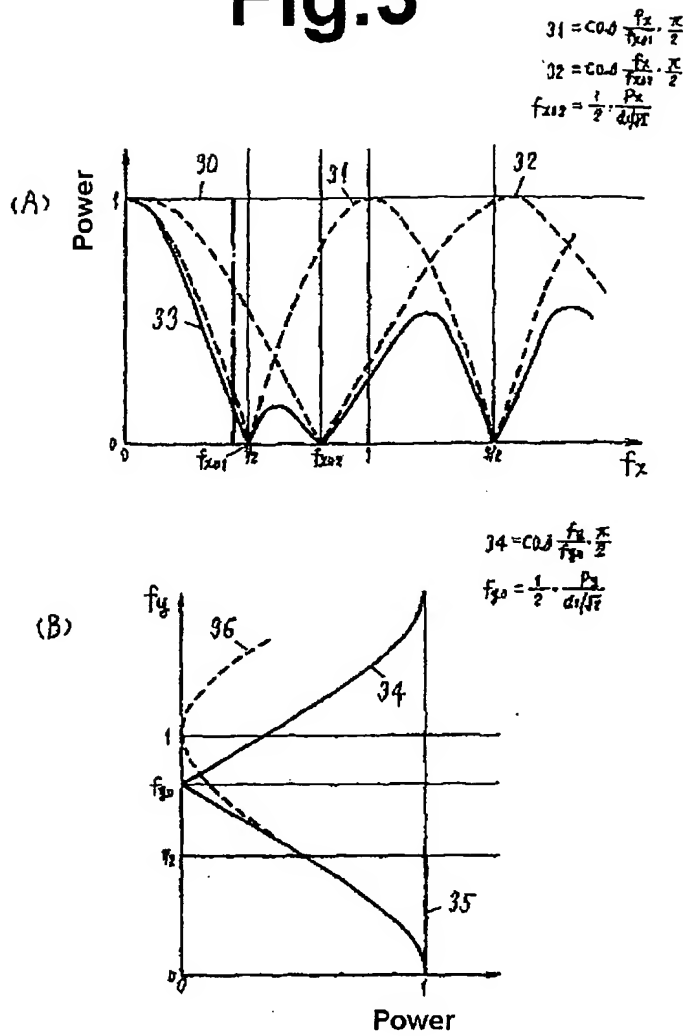


Fig.4

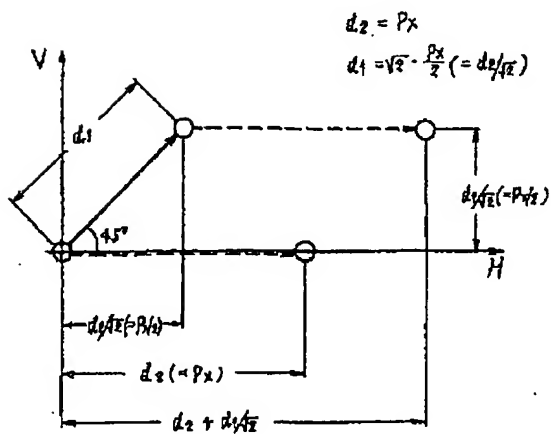


Fig.7

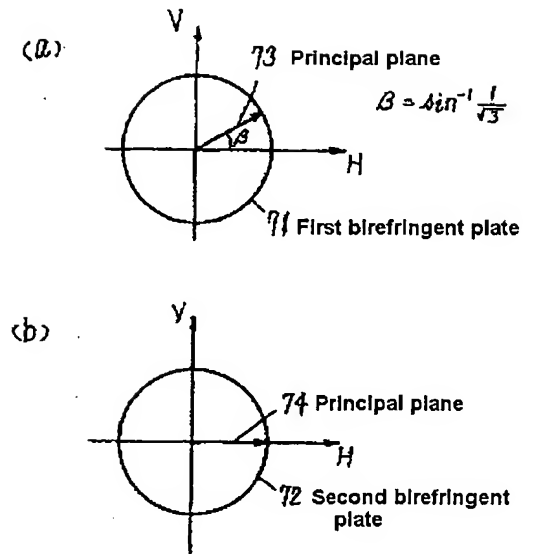


Fig.5

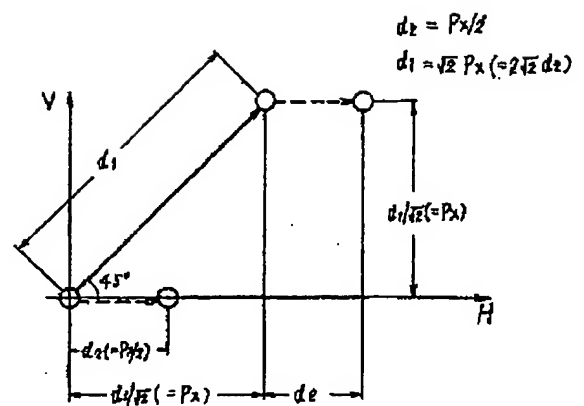


Fig.6

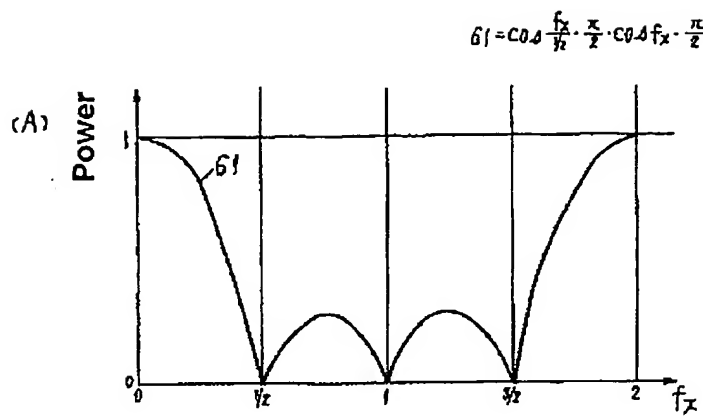


Fig.12

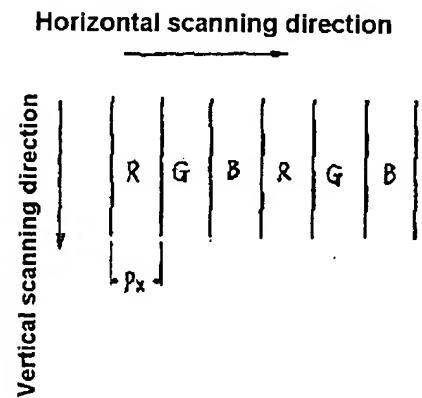


Fig.22

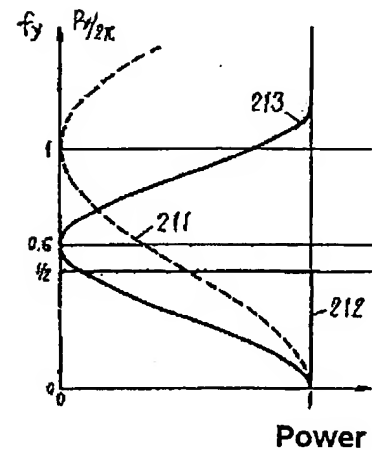
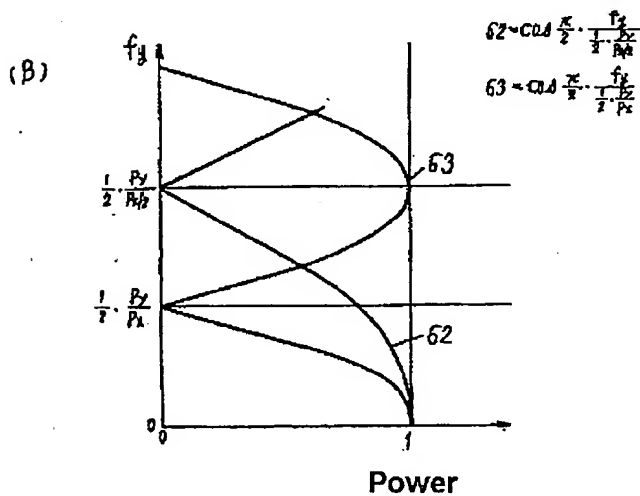


Fig.8

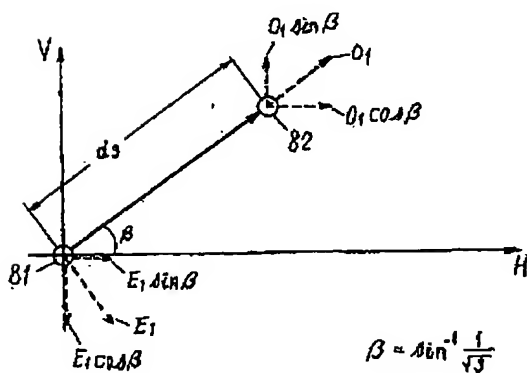


Fig.9

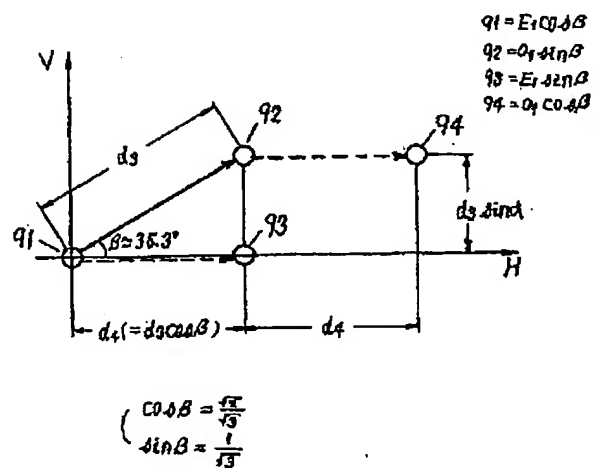


Fig.10

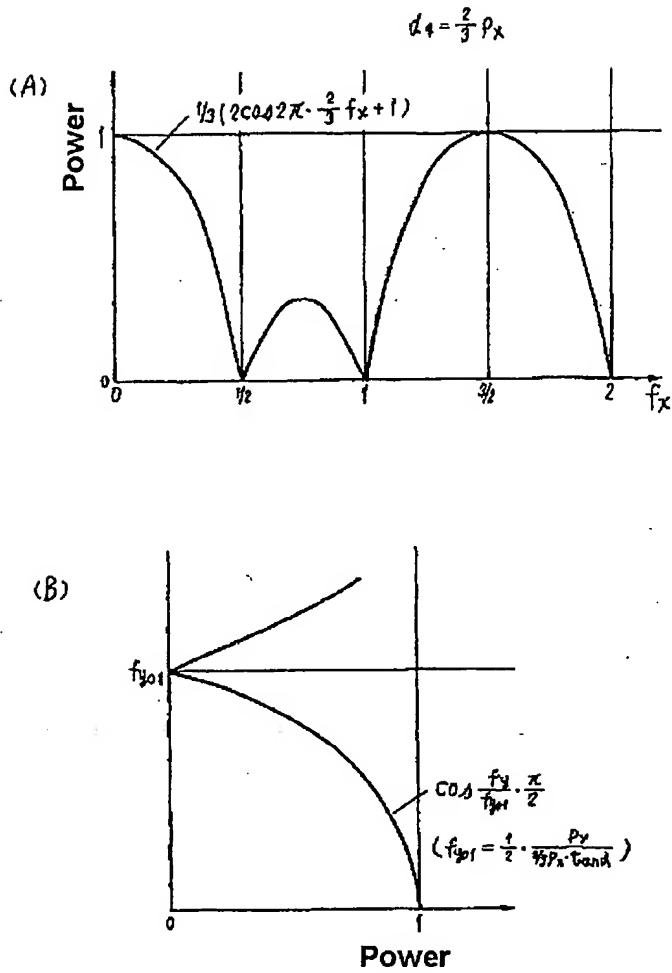


Fig.14

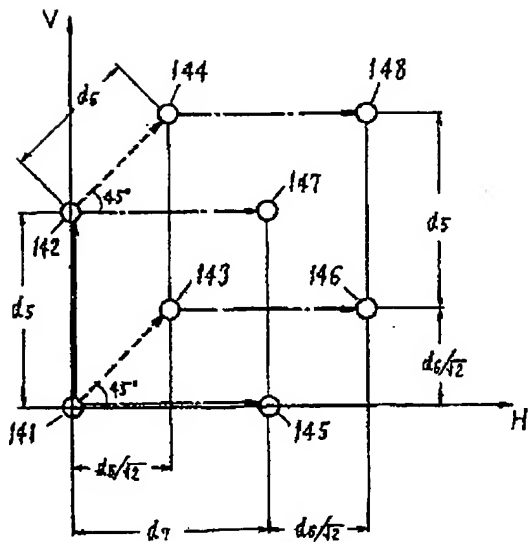


Fig.13

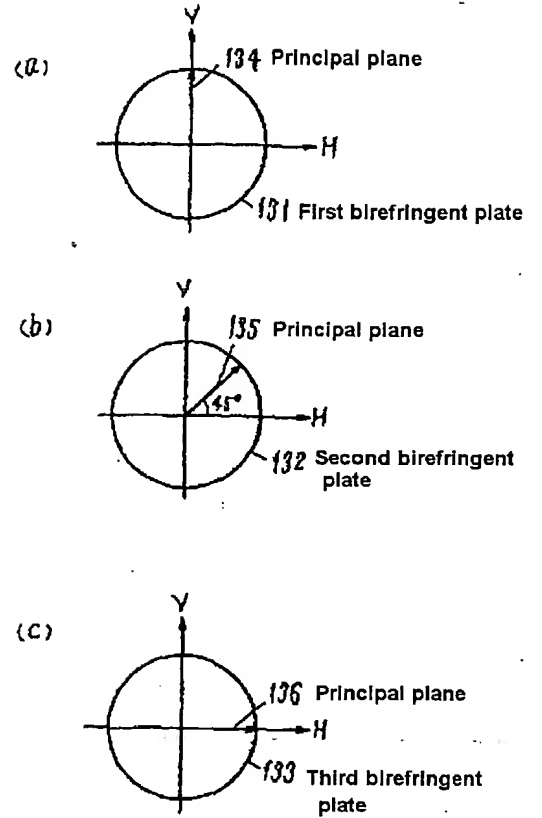


Fig.18

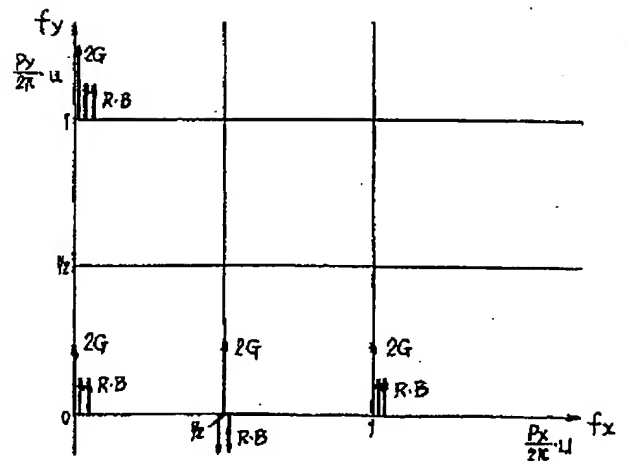


Fig.11

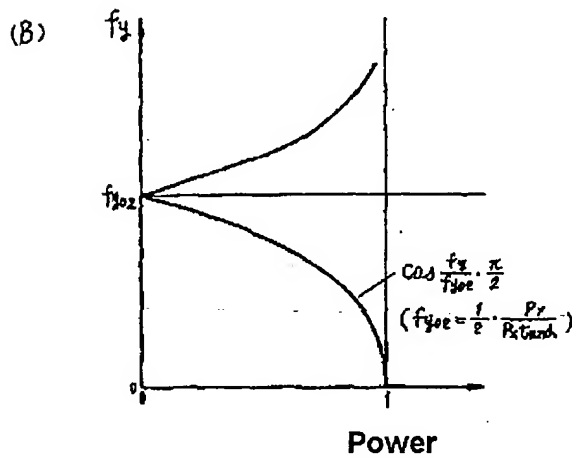
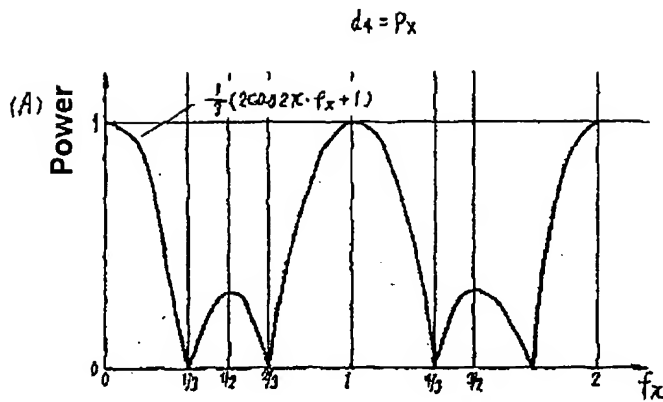


Fig.17

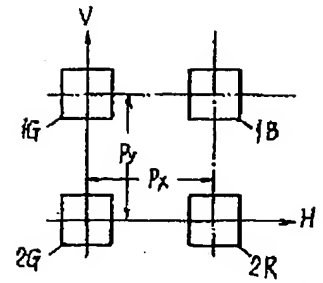


Fig.23

- 221 First birefringent plate
(separation by a distance $d_1 = P_x$ in the horizontal direction)
- 222 Second birefringent plate
(separation by a distance $d_2 = P_x/2$ in the horizontal direction)
- 223 Third birefringent plate
(separation by a distance $d_3 = P_y$ in the vertical direction)
- 224 First $\lambda/4$ phase plate
- 225 Second $\lambda/4$ phase plate

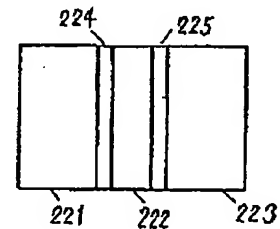


Fig.16

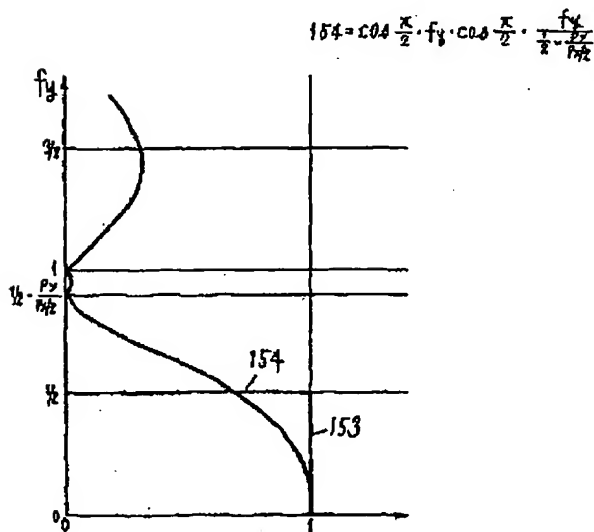


Fig.20

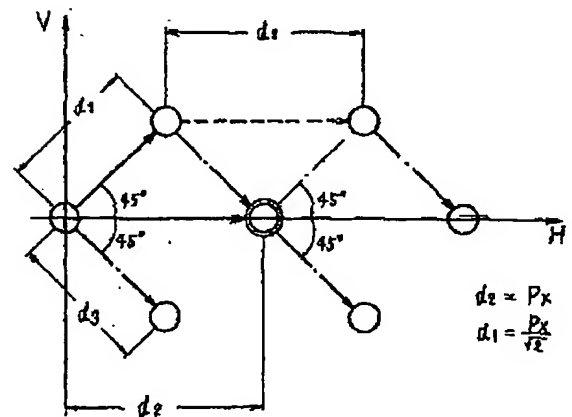


Fig.15

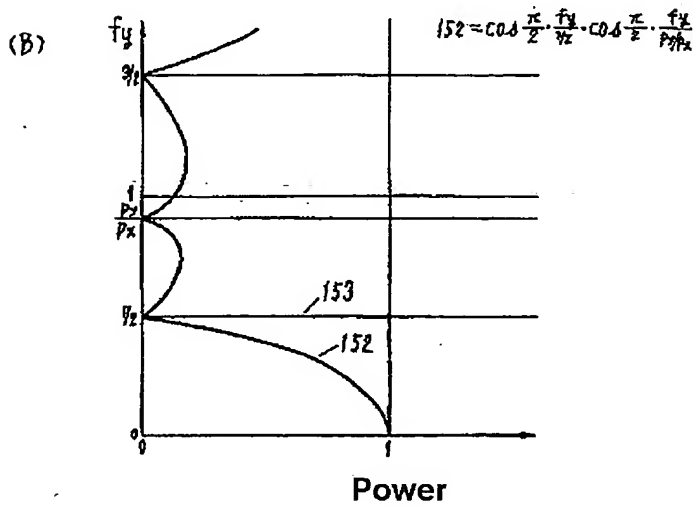
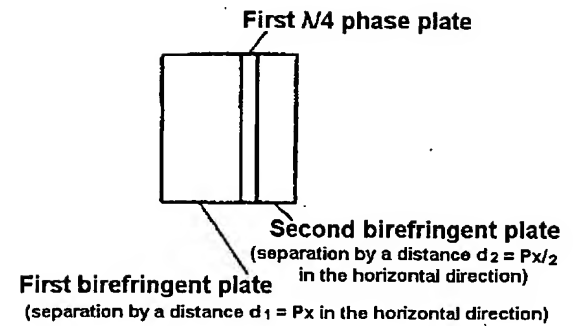
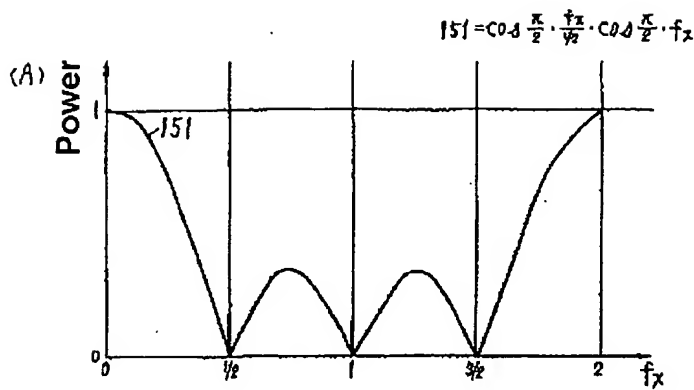


Fig.27

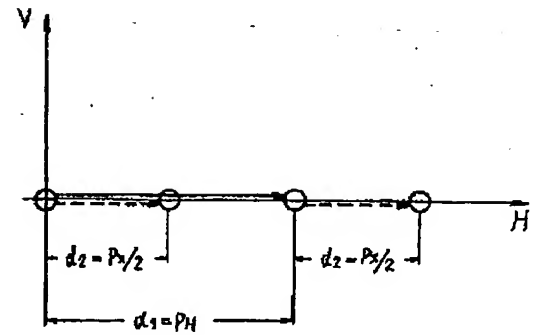


Fig.24

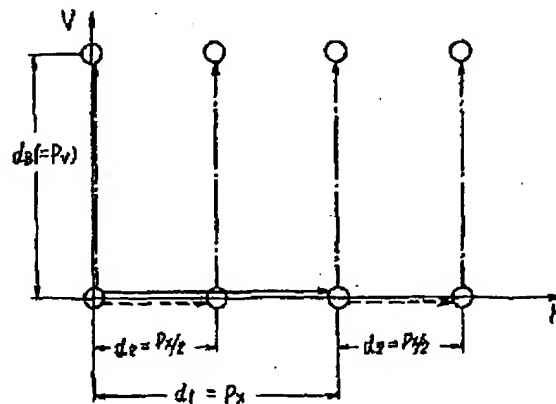


Fig.25

